



Deformoituvan metallirakenteen fotogrammetrinen muodonmuutosmittaus

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoo, huhtikuu 2015

Tekniikan kandidaatti Iiro Ranta

Valvoja: Professori Henrik Haggrén

Ohjaaja: TkT Petri Rönnholm

Tekijä Iiro Ranta

Työn nimi Deformoituvan metallirakenteen fotogrammetrinen muodonmuutosmittaus

Laitos Maankäyttötieteiden laitos

Professuuri Fotogrammetria ja kaukokartoitus

Professuurikoodi M3006

Työn valvoja Prof. Henrik Haggren

Työn ohjaaja(t) TkT Petri Rönnholm

Päivämäärä 07.04.2015

Sivumäärä 68+6

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Lähifotogrammetria tarjoaa tehokkaan tavan hankkia tietoa mitattavasta kohteesta siihen koskettamatta. Tässä työssä käsitellään fotogrammetrian teoriaa ja mittausprosessia sekä tutkitaan fotogrammetrisen menetelmän soveltuvuutta käytännön mittausongelmaan. Tämän työn mittausprosessin erityispiirteinä on ison, vaikeasti mitattavan rakenteen muodonmuutosmittaus käyttäen mittaukseen useamman kameran järjestelmää. Käytännön työ piti sisällään varsinaisen mittauksen lisäksi koekuvauksen säädellyissä olosuhteissa, jolla menetelmää kyseiseen mittausongelmaan validoitiin. Työn tarkoituksena oli selvittää kuinka hyvin fotogrammetrinen mittausmenetelmä soveltuu vaikeasti mitattavan metallirakenteen muodonmuutosmittaukseen.

Avainsanat Lähifotogrammetria, muodonmuutos

Author Iiro Ranta

Title of thesis Photogrammetric deformation measurement of a metal structure

Department Department of Real Estate, Planning and Geoinformatics

Professorship Photogrammetry and Remote sensing

Code of professorship M3006

Thesis supervisor Prof. Henrik Haggrén

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) TkT Petri Rönnholm

Date 07.04.2015

Number of pages 68+6

Language Finnish

Abstract

Close range photogrammetry provides an efficient way of obtaining knowledge of a measured target by the means of remote sensing. In this study the theory of photogrammetry is dealt with and the feasibility of using a photogrammetric method of measurement to practical application is explored. Specifically deformation measurement of a large structure using multi-camera system is studied. The practical part consists of validating the photogrammetric method in trial measurement performed in controlled environment and of the actual deformation measurement of the large structure. The goal was to determine how well photogrammetric method works in deflection measurement of an arduously measurable metal structure.

Keywords Close-range photogrammetry, deformation

Alkusanat

Tämän diplomityön aihe haettiin teollisuuden puolelta, eräältä koulumme kanssa yhteistyötä tehneeltä taholta. Fotogrammetrian opiskelijan näkökulmasta juurikaan parempaa aihetta ei olisi voinut toivoa, sillä todellisesta teollisuuden mittausongelmasta ammentu haasteellinen aihe ei tule varmasti kaikille lopputyötään tekeville vastaan. Alun perin mahdottomalta tuntunut aihe rupesi ajan mittaan saamaan käsiteltävän muodon, mikä ei olisi ollut mahdollista ilman työhön tiiviisti osallistuneen ja siinä suuresti auttaneen TkT Petri Rönholmin ammattitaitoista ohjaamista oikeaan suuntaan. Utopistinen kokonaisvaltaisen ja valmiin mittausprosessin räätälöinti tähän mittausongelmaan päätettiin haudata ja sen sijaan tutkia mahdollista tapaa selvittää jo jonkin aikaa selvittelyn alla ollutta tapausta sekä löytää vastaus siihen, onko kuvamittauksen keinoin mahdollista jatkossa luoda prosessi, jolla vastaavat mittaamisen haasteet saadaan ratkaistua. Mielinkiintoa työhön tuo osaltaan myös se, ettei fotogrammetrinen menetelmä suinkaan ollut ainoa tapa suorittaa mittaus, sillä muitakin menetelmiä ongelmaan on kokeiltu, tosin vailla tyydyttävää lopputulosta.

Työn tekeminen oli pitkä ja mutkikas, mutta samalla erittäin antoisa kokemus, joka olisi jäänyt varmasti kesken ilman perheeni ja ystäväni tukea. Iso käsi ja suuri kiitos teille jotka jaksoitte minuun uskoa, kun oma usko oli koetuksella. Kiitokset kuuluvat myös työn valvojalle professori Henrik Haggrénille, minkä lisäksi haluan kiittää myös yhteistyössä toimineita yrityksiä.

Espoo 7.4.2015

Iiro Ranta

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät ja lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tutkimuksen tausta	4
2.1	Kuvamittauksen perusteita	4
2.1.1	Digitaalikuvan muodostus.....	5
2.1.2	Kollineaarisuusehto.....	8
2.1.3	Koplanariteettiehto	9
2.2	Orientoinnit	11
2.2.1	Sisäinen orientointi	12
2.2.2	Ulkoinen orientointi	12
2.2.3	Keskinäinen orientointi	13
2.2.4	Absoluuttinen orientointi	14
2.3	Digitaalikuvien virhelähteet ja korjaukset.....	14
2.4	Kameran itsekalibrointi	19
2.5	Sädekimpputasoitus.....	24
3	Deformoituvan kappaleen muodonmuutosmittaus	27
3.1	Muodonmuutosmittaus laboratorio-olosuhteissa	27
3.2	Mitattava kohde ja mittauskalusto.....	31
3.3	Koekuvaukset	35
3.4	Koekuvauksissa kerätyn datan analysointi.....	37
3.4.1	Referenssikameran kalibrointi ja koekuvaukset.....	37
3.4.2	Teollisuuskameran kalibrointi ja koekuvaukset.....	42
3.5	Deformoituvan metallikappaleen mittaus.....	48
3.5.1	Laitteiston kalibrointi	48
3.5.2	Mittauksen valmistelu	49
3.5.3	Mittauksen referenssidata.....	50
3.5.4	Mittakuvat	52
4	Tulokset.....	57
5	Johtopäätökset.....	63
	Lähdeluettelo.....	65

Merkinnät ja lyhenteet

b		kuvakanta
c		kameravakio
dr		symmetrinen säteittäinen piirtovirhe
p		kuvapiste
P		kohdepiste
P_0		projektiokeskus
R		kiertomatriisi
λ		skaalauskerroin
ω	$[\circ]$	primaarikierto x-akselin ympäri
φ	$[\circ]$	sekundaarinen kierto kerran kiertyneen y_ω -akselin ympäri
κ	$[\circ]$	tertiäärinen kierto kahdesti kiertyneen $z_{\omega\varphi}$ -akselin ympäri
α	$[\circ]$	säteen tulokulma
CCD		Charged coupled device
CMOS		Complementary Metal-Oxide Semiconductor
EXIF		Exchangeable image file format
RMS		Root Mean Square

1 Johdanto

Fotogrammetriaa voidaan käyttää nykyään tehokkaasti erilaisten kohteiden mittaamiseen ja mallintamiseen, minkä on suurelta osin mahdollistanut sekä digitaalikameroiden että tietotekniikan nopea kehitys lähivuosina. (Luhman, T. 2010). Kuvamittauksen sovellusmahdollisuudet ulottuvat aina satelliittikuvien tulkinnasta mikrometritason tarkkuusmittauksiin. Fotogrammetria voidaan jakaa sovelluskohteiden ja mittauskaluston perusteella kauko- ja lähifotogrammetriaan, joista tämä työ keskittyy jälkimmäiseen. Työn keskiössä on fotogrammetrisen menetelmän soveltaminen kymmenien metrien pituiseen ja levyiseen, sekä näennäisesti jäykän metallikappaleen muodonmuutostulkintaan. Muodonmuutosmittauksesta puhuttaessa yleisemmällä tasolla, voi muodon muuttumisen syitä olla monia: tarkasteltavan rakenteen muoto voi muuttua esimerkiksi kokonpanovaiheessa tapahtuvan hitsauksen seurauksena, tai kun kappaletta kuormitetaan. Riippumatta mitattavan kohteen muodonmuutoksen syistä, on tulkinnassa kyseessä yleensä laadunvarmistuksen tehtävä, jossa sallitut poikkeamat suunnitelluista arvoista määrittävät rajat mittaustarkkuudelle. Mittaustarkkuuden vaatimukset sekä muut mittausprosessin asettamat rajoitteet kuten mittausympäristö määrittelevät mahdolliset tekniikat ja menetelmät, joita muutostulkintaan voidaan käyttää. Näistä menetelmistä fotogrammetrinen mittaus on yleistynyt lähivuosina sen joustavuuden ja parantuneen tarkkuuden ansiosta. Teknisesti ja taloudellisesti kannattavaksi teollisuuden mittaustekniikaksi lähifotogrammetria tuli 1980-luvun puolivälissä, jolloin muun muassa sillan deformaatiota mitattiin ensimmäistä kertaa fotogrammetrisesti. Tuolloin Bales ja Hilton (1985) mittasivat Washingtonissa sijaitsevan 139 metriä pitkän rautatiesillan yhden jännevälin taipuman keskimäärin 3,2mm tarkkuudella. Mitatun osan pituus oli noin 32,5m ja kuvaus suoritettiin suoraan sillan alapuolelta 6,4m etäisyydeltä. Bales & Hilton (1985) toteavat, että fotogrammetriassa mittaustarkkuus ilmoitetaan yleensä kuvausetäisyyden funktiona, joten mittauksissa saavutettu tarkkuuden suhdeluku oli 1:2000 (3,2mm/6400mm). Kuvauskaluston ja tietotekniikan kehityksen ansiosta nykyään kuvapisteen tarkkuudessa tietyissä sovelluskohteissa voidaan päästä jopa 1:100000 mittaustarkkuuksiin. (Fraser 2012)

Lähifotogrammetrian eri sovelluskohteita on paljon, mikä tarkoittaa suurta vaihtelua mm. kuvauskalustossa, kaluston kalibrointiprosessissa ja mittaamisen tarkkuusvaatimuksissa. Tässä työssä tarkkuusvaatimukset olivat yhteistyössä toimivien yritysten määrittämät, ja tarkoituksena oli selvittää metallisen kehikon muodonmuutoksen suuruus näiden tarkkuusvaatimusten rajoissa monikamerajärjestelmää käyttäen. Mittauksen kannalta tärkeitä tuloksia olivat:

1. Millä tarkkuudella kuvattavaan kohteeseen kiinnitetyt tähypisteet saatiin mitattua
2. Kuinka tarkasti kappaleen muodonmuutos saatiin mitattua rakenteen taipuessa sitä kuormitettaessa

Työn tarkoituksena ei ollut saada aikaiseksi valmista mittausprosessia, vaan selvittää valitun mittaustekniikan soveltuvuus tähän mittaustilanteeseen. Toisaalta tehtyjä havaintoja voidaan hyödyntää suunniteltaessa valmista mittausprosessia. Työssä otetaan kantaa eri virhelähteisiin, sekä pyritään löytämään oikea kuvaustilanne, jossa eri virhelähteiden vaikutus saataisiin minimoitua. Muun muassa tätä näitä asioita varten mittausprosessiin on sisällytetty koekuvaus, jolla pyritään selvittämään varsinaisessa mittauksessa kohdattavat haasteet.

Ymmärtääksemme mittausprosessin eri vaiheet ja mahdolliset virhelähteet sekä mitauskaluston valinnan on meidän käytävä läpi fotogrammetrian taustalla vaikuttavaa teoriaa, jota käsitellään luvussa 2. Samassa luvussa esitellään myös laboratorioolosuhteissa suoritettu fotogrammetrinen muodonmuutosmittaus ja tutkitaan mahdollisuuksia hyödyntää siinä käytettyjä tekniikoita tämän työn mittausprosessissa.

Luku 3 käsittelee käytännön työtä, joka tutkimuksessa suoritettiin. Tämä mittausprosessi voidaan jakaa neljään osaan:

1. Kuvattavaan kohteeseen tutustuminen
2. Mittausmenetelmän valinta, kaluston kalibrointi ja koekuvaus
3. Mittauksen suunnittelu koekuvauksessa kerätyn aineiston perusteella
4. Varsinainen mittaus ja mittauksessa kerätyn datan analysointi

Neljännessä luvussa esitellään mittaustulokset ja viidennessä vedetään johtopäätökset tulosten perusteella sekä pohditaan kuinka tämä mittausmenetelmä toimi tässä käytännön sovelluskohteessa.

2 Tutkimuksen tausta

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää noin 25m×8m kokoisen metallikehikon muodonmuutos, kun sitä kuormitettiin pituussuunnassa puolesta välistä raskaalla, noin 40 tonnia painavalla punnuksella. Muodonmuutoksen tulkintaan ja mittaukseen pyrittiin löytämään luotettava ja tarkka mittausmenetelmä, joka toimisi haasteellisessa mittaustilanteen mukaisessa ympäristössä. Mittausmenetelmää valittaessa oli otettava huomioon useita rajoitteita, joita mitattava kohde ja työympäristö asettivat. Työympäristönä toimi itse mitattava kappale, joka se sijaitsi noin 25m korkeudella maasta, kulmistaan palkeilla tuettuna. Tämän takia mittauskalusto oli kiinnitettävä mitattavaan kohteeseen, mikä johti siihen, että rakenteen oletettu muodonmuutos saattoi vaikuttaa siihen, että mittauskalusto pääsi liikkumaan. Mittauksen pitäisi tästä huolimatta tuottaa kohteesta mahdollisimman kattava kolmiulotteinen ja mittatarkka malli tai pisteistö niin, että koko kappale tulee mitattua samanaikaisesti, jotta muutostulkinta lepo- ja kuormitustilan välillä olisi mahdollinen. Fotogrammetrisen mittausmenetelmän valinta oli täten perusteltu, sillä oikein valitulla kuvauskalustolla ja hyvin suunnitellulla mittausprosessilla lähes koko kohteesta saatiin tallennettua tiheä pistejoukko siihen fyysisesti koskematta.

Tutkimusongelmaan liittyvän käytännön työn ymmärtämisen kannalta tulee teoriaa tutkimuksen taustalla avata, minkä takia aluksi käydään läpi työlle välttämättömiä fotogrammetrisia perusteita ja digitaaliselta kuvalta mittaamista. Kappaleiden muodonmuutosmittaus on teollisuuden laadunvalvonnan näkökulmasta mielenkiintoinen tutkimuskohde ja siihen liittyen on tehty tutkimuksia, joita työssä myös esitellään. Muiden tutkimusten havaintoja hyväksi todettuja menetelmiä pyrittiin myös hyödyntämään tämän työn suunnittelussa ja mittausprosessissa.

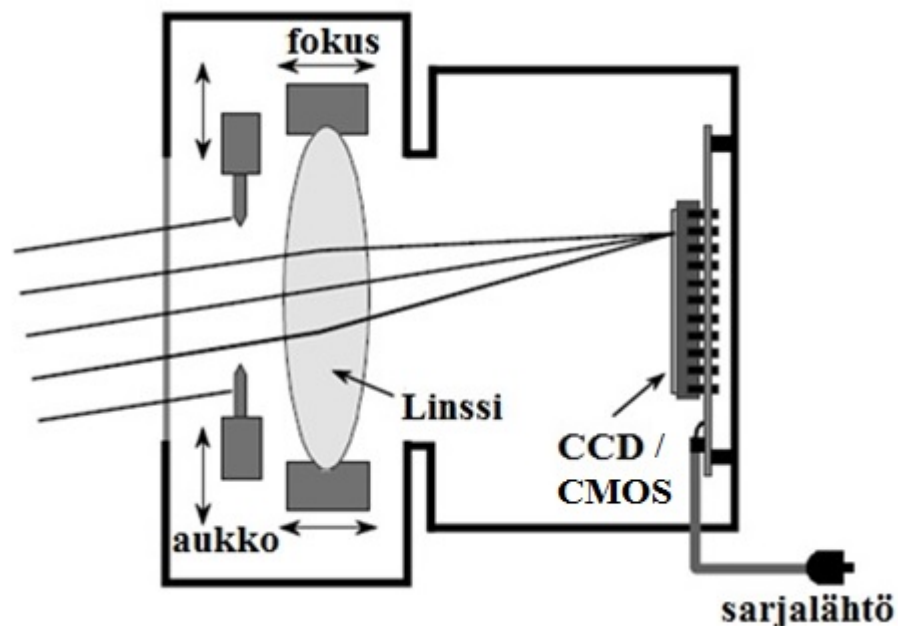
2.1 Kuvamittauksen perusteita

Kuvamittaus on ollut olemassa jo pitkään ennen digitaalisia kameroita, mutta koska nykyään lähes kaikki kuvamittaus tapahtuu digitaalisesti, keskitytään seuraavaksi digitaalikuvalta laskemiseen. Otettujen kuvien mittaustarkkuuteen vaikuttaa useita tekijöitä, joihin voidaan vaikuttaa eri mittausprosessin vaiheissa. Yleisesti ottaen pätee, että mitä suurempiin tarkkuuksiin halutaan päästä, sitä enemmän on uhrattava vaivaa, aikaa ja

rahaa. Mittauksen tavoitteet kannattaa määrittellä tarkasti, ennen kuin itse kuvaaminen aloitetaan, sillä huono määrittely voi johtaa joko liian epätarkkoihin tuloksiin tai turhaan resurssien käyttöön tavoiteltaessa tarpeettoman suurta mittaustarkkuutta tai informaatiota, jota ei tarvita. Riippumatta fotogrammetrian sovelluskohteesta, pätee fotogrammetriassa kuitenkin aina tietyt lainalaisuudet, joita käydään seuraavaksi läpi.

2.1.1 Digitaalikuvan muodostus

Digitaalinen kuva syntyy, kun kuvattavasta kohteesta heijastuvat ja säteilevät näkyvän valon alueen säteet kulkevat kameran optiikan kautta kameran kennolle. Tarkemmin sanoen tieto kohteesta tallentuu kameran valoherkistä elementeistä koostuvalle säännölliselle hilalle (kameran kenno), jonka määrittämää koordinaatistoa (pikselikoordinaatisto) voidaan käyttää koordinaatistona kuvamittauksessa. (Inkilä 2012c)



Kuva 1: Kameran kuvanmuodostus (Smith 2011 (dspguide))

Kuva 1 havainnollistaa kameran toimintaa. Kameran optiikkaa voidaan säätää kuvaolosuhteiden mukaan: Aukon kasvattaminen lisää kennoon saapuvan valon määrää, jolloin voidaan kuvata pimeämmässä. Toisaalta kasvattamalla aukkoa kuvan syvyysterävyys huononee ja kameran näkymässä eri etäisyyksillä sijaitsevat objektit näkyvät sumeina. Toinen pimeässä kuvaamisen mahdollistava keino on säätää valotusaikaa, eli sitä kuinka nopeasti aukko suljetaan. Valotusajan pidentäminen mahdollistaa pimeäm-

mässä kuvaamisen, mutta samalla korostaa laitteiston tai kohteessa tapahtuvan liikkeen, mikä aiheuttaa kuvaan epätarkkuutta. Säättämällä linssin fokusta saadaan tietyllä etäisyydellä sijaitsevat kohteet teräviksi. Kun fokus tarkennetaan äärettömyyteen, se vastaa kameravakiota c , joka on kameran sisäisen geometrian ja kuvamittauksen kannalta tärkeässä asemassa. Kuvausolosuhteiden ja sovelluskohteen huomioiminen mittausprosessia suunnitellessa ovat tärkeässä roolissa, sillä edellä mainittuja kompromisseja tulee kuvatessa vastaan väistämättä ja eri ominaisuuksien välillä pitää tehdä valintoja. Kuvassa 1 esitetyssä kameramallissa ei ole kuvattuna kameran kuvausominaisuuksiin suuresti vaikuttavaa objektiivia, joita on saatavana sekä kiinteä- että muuttuvapolttovälinä.

Kuvamittauksen kannalta helpompi vaihtoehto on käyttää kiinteäpolttovälistä objektiivia, jonka kuvanlaatu on usein muuttuvapolttovälistä parempi yksinkertaisemman rakenteen ansiosta, minkä lisäksi kuvamittausta varten suoritettava kameran kalibrointi joudutaan selvittämään muuttuvan polttovälin objektiiveille jokaiselle polttovälin arvolle erikseen. Toisaalta muuttuvan polttovälin objektiivien käyttäminen tuo mittauksiin joustavuutta, jota voidaan tarvita mittaustilanteessa, jossa kameroiden sijoittelu voi olla rajoitettua ja kohdepisteet saadaan erottumaan säättämällä polttoväliä. Muun muassa Zheng ym. (2015) ovat tutkineet niin sanottujen zoom-objektiivien kalibrointia lähifotogrammetrista mittausta varten.

Optiikan lisäksi kuvan laatuun ja tarkkuuteen merkittävästi vaikuttava tekijä on kameran kenno, johon kohteesta saatava tieto kerätään. Kenno on yleensä joko CCD (Charged Coupled device) tai CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor), joista jälkimmäinen on teknisesti uudempi ja tarjoaa monipuolisia kehitysmahdollisuuksia, joita jo teknisesti kypsytynyt CCD tekniikka ei välttämättä pysty tarjoamaan. CCD kennot ovat yleisesti ottaen kalliimpia tuottaa ja kuluttavat enemmän virtaa kuin CMOS kennot, minkä takia esimerkiksi jokaisen tässä työssä käytetyn kameran kenno hyödyntää CMOS-tekniikkaa. Blancin (2001) mukaan kennojen suurin ero tulee CMOS:in kyvystä signaalin prosessointiin tai muihin lisätoimintoihin suoraan pikselitasolla, mihin CCD-tekniikalla ei kyetä. CMOS-kennoissa datan prosessointi voidaan suorittaa samanaikaisesti kuvanoton kanssa, toisin kuin CCD-kennossa. Sekä kennon koko, että pikselien määrä kennossa vaihtelee kamerasta riippuen, mutta digitaalisen kuvan rakenne, jota havainnollistetaan kuvassa 2, pysyy periaatteessa samana.



Kuva 2: Digitaalinen värikuva

Yleisesti ottaen värikuvilla jokaiselle pikselille annetaan kolme arvoa samalla vaihteluvälillä 0-255 ja ne kuvaavat sinisen, vihreän ja punaisen intensiteettiä pikseliä kohden. Tarjolla on myös kameroita, jotka hyödyntävät suurempaa bittimäärää, mutta yleisimmissä värikuvissa yhteensä 256 eri mahdollista arvoa tulee siitä, että kyseinen kuva sisältää yhteensä 8-bittia kanavaa kohden, eli yhteensä $2^8=256$. Kun kaikki kolme (sininen, punainen ja vihreä) yksittäisen pikselin arvoa yhdistetään, mahdollisia värivaihtoehtoja tulee $2^{8*3}=16\,777\,216$. Kuvan voi esittää matriisimuodossa, jolloin jokainen pikseli on alkio, jolla on oma arvonsa tai värikuvien tapauksessa kolme arvoa. (Smith 2011). Digitaalinen kuva voi sisältää myös muun kuin näkyvän aallonpituuden informaatiota. Esimerkiksi satelliittikuvat voivat sisältää infrapuna-alueen informaatiota, jota voidaan hyödyntää muun muassa kasvillisuuden havainnointiin, mutta tällöinkin digitaalinen kuva esitetään esimerkiksi niin, että kuvassa sinisen kaistan intensiteettiä tilalle annetaan infrapuna-alueen intensiteettiä, jolloin ihmissilmällä näkymätön valon aallonpituus saadaan havainnollistettua niin sanotulla väärävärikuvalla. Tämän työn sovelluskohteeseen saadaan tarvittava informaatio näkyvän valon alueelta, joten multispektrikuviin ei paneuduta tämän syvemmin.

2.1.2 Kollineaarisuusehto

Kollineaarisuusyhtälö on fotogrammetrian teorian kannalta yksi keskeisimmistä lausekkeista, sillä se sitoo yhteen kuvapisteen p , kohdepisteen P ja projektiokeskuksen P_0 , joiden on ehdon mukaan sijaittava samalla avaruussuoralla. Ehto voidaan esittää vektorialgebraa käyttäen:

$$p = \lambda(P - P_0) \quad (1)$$

vektori p :n koordinaatit ovat kamerakoordinaatistossa ja vektorin $P - P_0$ koordinaatit puolestaan kohdekoordinaatistossa, joten muunnos koordinaatistojen välillä on otettava huomioon.

$$p = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix}, P - P_0 = \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Muunnos koordinaatistojen välillä koostuu kierrosta ja skaalauksesta. Ortogonaalinen 3x3-kiertomatriisi R ($\det R = +1$), määrää kierron koordinaatistojen välillä, kun taas skaalauksen määrää mittakaavaparametri λ :

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Kiertomatriisi R on auki kirjoitettuna:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa \\ -\cos\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa \\ \sin\varphi & -\sin\omega\cos\varphi & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

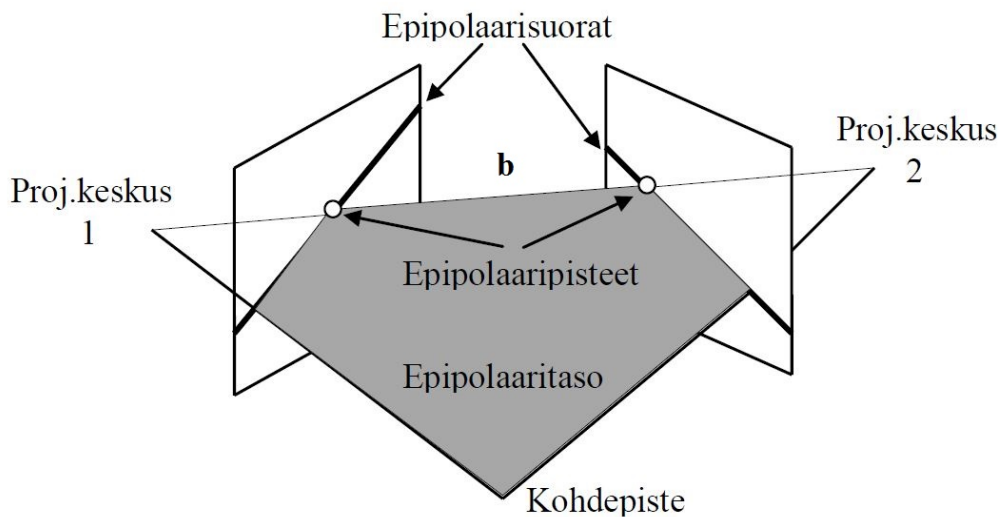
jossa ω on kierto x-akselin, φ on kierto y-akselin ja κ on kierto z-akselin ympäri. Mittakaavaparametrin λ päästään eroon jakamalla kaavassa (3) 1. ja 2. yhtälö kolmannella, jolloin yhtälöryhmä saa ”klassisen” esitystavan:

$$\begin{cases} x - x_0 = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = -c \frac{N_x}{D} \\ y - y_0 = -c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = -c \frac{N_y}{D} \end{cases} \quad (5)$$

Yhtälön yhdeksän parametria koostuvat sisäisen- ja ulkoisen orientoinnin parametreista. Sisäisen orientoinnin parametrit ovat pääpiste (x_0, y_0) ja kameravakio c , jotka ratkaistaan kameran kalibroinnissa. Kalibroinnissa määritetään usein myös optiikan piirtovirheet ja kuvatason virheet, joita käsitellään luvussa 2.2.3. Systemaattiset virheet voidaan huomioida kollineaarisuusyhtälössä laajentamalla mallia lisätermeillä dx ja dy . (Inkilä 2012b).

2.1.3 Koplanariteettiehto

Koplanariteettiehto on kollineaarisuusehdon tavoin fotogrammetrian olennaisimpia käsitteitä ja sen perusta on, että havaintovektorit ja kantavektori virittävät tason. Koplanariteettiehto siis kytkee toisiinsa kohdepisteen, joka kuvautuu kahdelle eri kuvalle *vastinpisteinä*, sekä projektiokeskusten välisen kuvakannan b , jotka sijaitsevat samassa *epipolaaritasossa*.

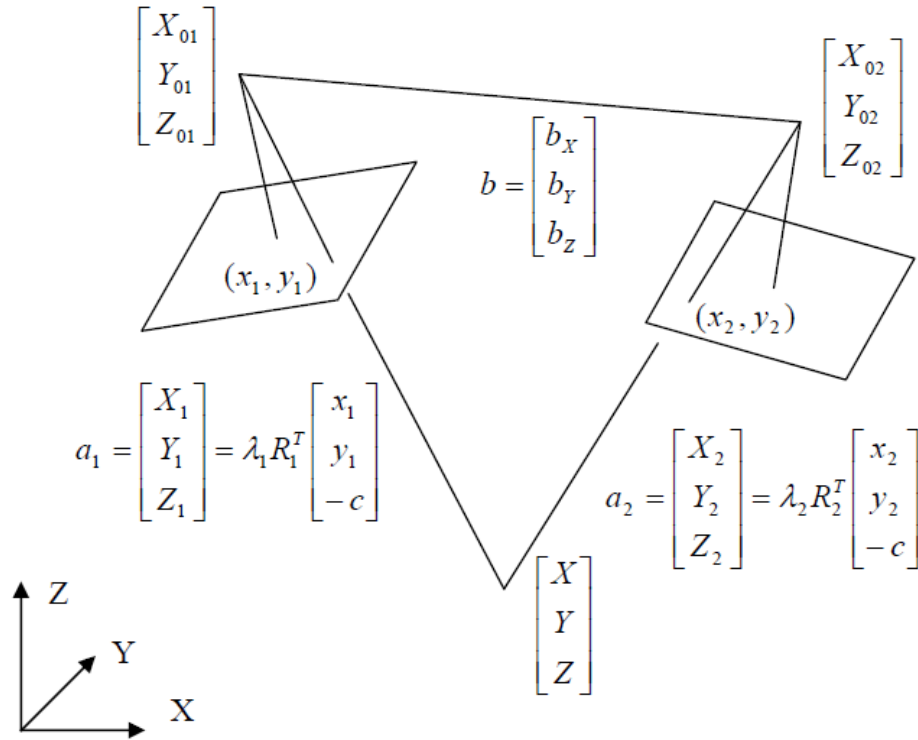


Kuva 3: Koplanariteettiehto (Inkilä 2012a)

Kuva 3 havainnollistaa koplanariteettiehtoa, johon läheisesti liittyy myös *epipolaariehto*: Annetun kuvapisteen vastinpiste toisella kuvalla sijaitsee epipolaarisuoralla (Inkilä 2012a). Projektiokeskuksista vastinpisteille muodostuvat vastinsäteet a_1 ja a_2 sekä kan-

tavektori b ovat samassa tasossa, mikäli niiden virittämän suuntaissärmiön tilavuus $= 0$, eli *skalaarikolmitulo* $= 0$. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 4.

$$a_1 \times a_2 \cdot b = 0 \quad (6)$$



Kuva 4: Koplanariteettiehto vastinsäteiden ja kuvakannan avulla lausuttuna (Inkilä 2012a)

Valitsemalla mielivaltainen 3D-koordinaatisto saadaan vektoreille seuraavat komponenttesitykset:

$$a_1 = \begin{bmatrix} X - X_{01} \\ Y - Y_{01} \\ Z - Z_{01} \end{bmatrix}, a_2 = \begin{bmatrix} X - X_{02} \\ Y - Y_{02} \\ Z - Z_{02} \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} X_{02} - X_{01} \\ Y_{02} - Y_{01} \\ Z_{02} - Z_{01} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Nyt koplanariteettiehto voidaan ilmaista determinanttimuodossa:

$$\begin{vmatrix} b_X & b_Y & b_Z \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

Olkoon R_1 ja R_2 kiertomatriiseja, jotka muuntavat mallikoordinaatit kamerakoordinaateiksi. Kun otetaan kiertomatriisit mukaan yhtälöön (8), saadaan lopullinen esitysmuoto koplanariteettiehdolle:

$$G(x_1, y_1, x_2, y_2; \kappa_1, \varphi_1, \omega_1, X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \kappa_2, \varphi_2, \omega_2, X_{02}, Y_{02}, Z_{02}) = 0$$

Koplanariteettiehto sisältää vastinpisteiden kuvakoordinaatit sekä molempien kuvien ulkoisen orientoinnin parametrit. Kuvahavaintojen invarianssiominaisuuden takia ulkoiset orientoinnit voidaan määrätä kuvahavainnoista 7-parametriseen yhdenmuotoismuunnokseen asti (Inkilä 2012a). Tämä tarkoittaa, että kappaleesta voidaan muodostaa kohteen kanssa yhdenmuotoinen malli. Kahdestatoista ulkoisen orientoinnin parametrin joukosta voidaan valita viisi parametria, jotka määräävät kuvaparin keskinäisen orientoinnin. Inkilä (2012a) on antanut esimerkkinä parametrien valinnasta *kuvaliitosmenetelmän*, jossa vasemman kuvan kierrot ja koordinaatit sekä kuvakannan X-komponentti kiinnitetään ja oikean kuvan parametrit ratkaistaan. Esimerkin mukaan antamalla vasemman kuvan parametreille arvoksi nolla, saadaan mallikoordinaatistoksi vasemman kuvan kamera koordinaatisto. (Inkilä 2012a)

2.2 Orientoinnit

Orientoinnit ovat fotogrammetriassa keskeisessä asemassa, sillä ilman orientointien parametrien selvittämistä ei otetuilta kuvilta voitaisi mitata. Orientoinneista tämän työn kannalta tärkeimmät ovat sisäinen orientointi, jolla selvitetään kamerasuhteellista geometriaa, ulkoinen orientointi, jolla selvitetään kamera- ja kohdekoordinaatiston yhteys sekä keskinäinen orientointi, jolla selvitetään kuvanottopaikkojen keskinäinen sijainti ja asema toisiinsa nähden. Kun kolme edellä mainittua orientointia on selvitetty, voidaan kuvastusta kohteesta muodostaa mittatarkka kolmiulotteinen pisteistö, jonka koordinaatisto on käytännössä vapaasti valittavissa. Koska keskinäinen orientointi kuitenkin varmistaa mitattavan 3D mallin oikeellisuuden, voidaan keskinäisen orientoinnin jälkeen mallilta mitata etäisyyksiä, kun malli on sidottu mittakaavaan tunnetun kahden pisteen etäisyyden avulla. Mikäli pisteistö halutaan kuvata jossain muussa koordinaatistossa, tulee suorittaa absoluuttinen orientointi, jolla muodostettu malli saadaan muunnettua haluttuun koordinaatistoon. Esimerkiksi ilmakuvauksesta puhuttaessa tämä tarkoittaa sitä, että mittatarkka maastomalli saadaan muodostettua kolmen ensimmäisen orientoinnin avulla ja absoluuttisella orientoinnilla malli voidaan tuoda esimerkiksi valtakunnalliseen koordinaatistoon, jolloin mallille saadaan tarkka sijainti kartalla. Absoluuttinen orientointi ei ole tämän työn laajuuden puitteissa yhtä merkityksellinen kuin kolme

edellä mainittua, sillä kohteesta muodostettua pisteistöä ei tarvitse tarkastella muussa koordinaatistossa, vaan riittää kun kohteesta saadaan muodostettua mittatarkka pisteistö. Fotogrammetriasta laajemmin puhuttaessa ei absoluuttista orientointia voida kuitenkaan ohittaa.

2.2.1 Sisäinen orientointi

Sisäinen orientointi on tärkeä operaatio kuvamittauksen kannalta ja riippuen fotogrammetrisesta tehtävästä sillä voidaan tarkoittaa kahta eri asiaa:

1. Sisäisen orientoinnin tuntemattomien parametrien määrittäminen, joka laajemmassa mielessä sisältää optiikan piirtovirheet.
2. Kuvakoordinaattien muuntaminen pääpistekoordinaatistoon tunnetun sisäisen orientoinnin avulla.

Kuvan muodostavan sädekimpun rekonstruointi ei onnistu ilman sisäisen orientoinnin tuntemista ja tämän työn puitteissa sisäisellä orientoinnilla tarkoitetaan kameran sisäisen geometrian ratkaisemista, mukaan lukien optiikan piirtovirheet. Sisäisen orientoinnin parametrit selvitetään iWitness-ohjelman itsekalibrointimenetelmällä, jota on kuvattu tarkemmin kohdassa 2.4.

2.2.2 Ulkoinen orientointi

Ulkoisella orientoinnilla selvitetään kamera- ja kohdekoordinaatiston yhteys. Ulkoisen orientoinnin parametrit ovat kolme projektiokeskuksen paikkakoordinaattia (X_0 , Y_0 , Z_0) ja kuvan kolme kiertokulmaa (ω , ϕ , κ). Joskus ulkoisen orientoinnin määrittystä kutsutaan taaksepäinleikkaukseksi avaruudessa.

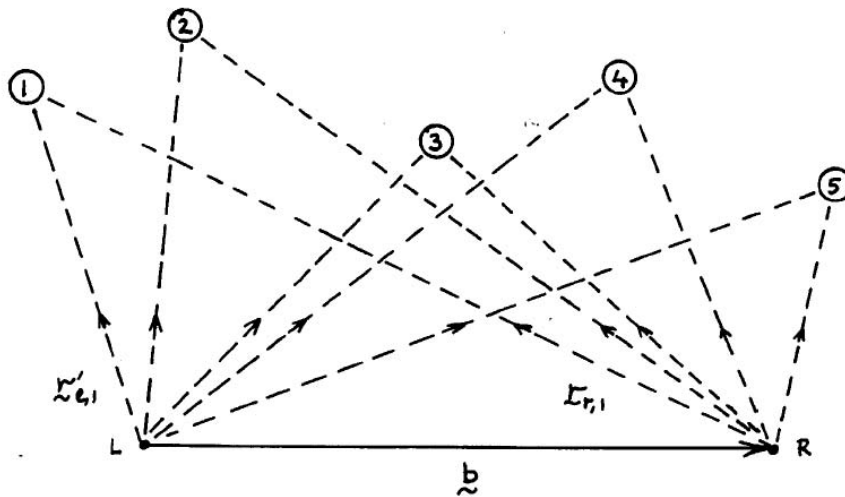
Kun sisäinen orientointi tunnetaan, ulkoinen orientointi ratkeaa kollineaarisuusyhtälön (5) avulla. Jokainen mitattu piste antaa kaksi yhtälöä, joten kuuden ulkoisen orientoinnin parametrin ratkaisemiseksi on tunnettava vähintään kolmen pisteen kohdekoordinaatit ($3 \times 2 = 6$). (Inkilä 2012a)

Kohdekoordinaattien tarkkuus vaikuttaa ulkoisen orientoinnin virheiden tasoitusvaihtoehtoihin: Jos koordinaatit ovat erittäin tarkkoja, voidaan suorittaa virheyhtälötasointus, jossa kohdekoordinaattien lisävirheyhtälöitä painotetaan tasoituksessa. Jos kohdekoordinaatit ovat vähemmän tarkkoja, ovat lisävirheyhtälöiden painot verrannollisia tarkkuu-

teen. Epätarkkojen koordinaattien tapauksessa voidaan myös suorittaa yleinen PNS-tasointus, joka on laskentateknisesti virheyhtälötasointusta monimutkaisempi. (Inkilä 2012a).

2.2.3 Keskinäinen orientointi

Keskinäisessä orientoinnissa selvitetään kameran paikka- ja kiertoasema toisen kameran suhteen kantavektorin ja projektiokeskusten välisen kierron avulla. Keskinäisen orientoinnin ratkaisuun on jo pitkään ollut olemassa iteratiivisia menetelmiä, joita ilman useita tämän päivän topografisia karttoja ei olisi olemassa. (Horn 1989). Varhaisemmat menetelmät ovat vaatineet hyviä lähtöliikarvoja toimiakseen, mutta Horn (1989) on kuvannut tutkimuksessaan keskinäisen orientoinnin ratkaisemiseksi yksinkertaisen iteratiivisen menetelmän, joka ei vaadi tarkkoja alkuarvoja kantavektorille ja kierrolle. Toimiakseen menetelmä vaatii vain sädekimppuparin, jonka kameroiden projektiokeskukset ja kohdenäkymän vastinpisteet muodostavat. Viiden projektiokeskuksesta kohdepisteeseen virittyvän vektorin suunta on tunnettava molemmissa kamerakoordinaatistoissa. Kuvassa 7 Horn (1989) on esittänyt keskinäisen orientoinnin ongelman kaksiulotteisena.



Kuva 5: Keskinäinen orientointi (Horn 1989)

Kuvassa 5 kantavektori on b ja projektiokeskukset L ja R . Kohdenäkymän vastinpisteitä puolestaan kuvataan numeroiduilla (1-5) ympyröillä. Kuvakantaa ei voida selvittää ilman, että tiedetään jonkin suoran pituus kuvanäkymässä, joten kantaa tulisi käsitellä yksikkövektorina, jolloin kuvakanta asettaa skaalan mitatulle pisteistölle. (Horn 1989)

Luvussa 2.1.3 kuvatus koplanariteettiehdon avulla voidaan määrittää keskinäinen orientointi.

2.2.4 Absoluuttinen orientointi

Keskinäisen orientoinnin tuloksena kohteesta voidaan muodostaa mielivaltaisessa mallikoordinaatistossa yhdenmuotoinen malli ja absoluuttisen orientoinnin tuloksena kuvilta mitattu 3D pisteistö tai rekonstruoitu 3D malli saadaan muutettua haluttuun koordinaatistoon (Inkilä 2012a). Absoluuttinen orientointi voidaan esittää seitsemän parametrin avulla, joita ovat kolme siirtoa ja kiertoa sekä mittakaava. Muunnos koordinaatistojen välillä on 3D-yhdenmuotoisuuksien muutos.

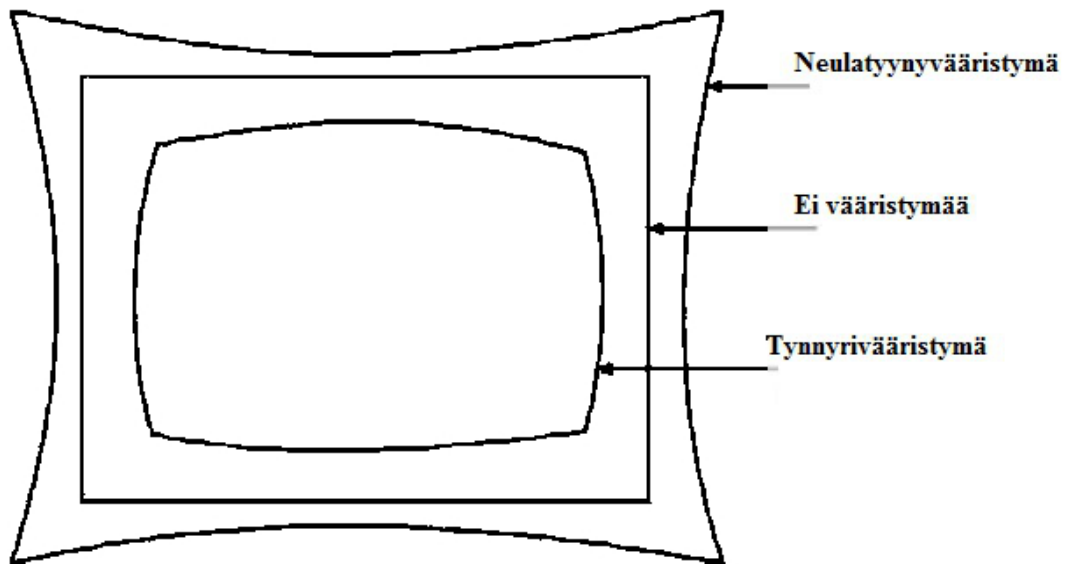
Absoluuttinen orientointi on otettava huomioon, jos esimerkiksi tässä työssä mitattava kappale haluttaisiin sijoittaa jonkin testikentän koordinaatistoon, jolloin testikentän vaikutus muodonmuutokseen voitaisiin ottaa mukaan mittaukseen. Mitatun kappaleen sijoittaminen toiseen koordinaatistoon voidaan suorittaa esimerkiksi käyttäen apuna mittakuvilla näkyviä koordinaateiltaan tunnettuja maaston tukipisteitä (eng. Ground Control Point, GCP). Toisaalta jos käytössä on GPS-laitteisto, jonka sijainti ja asema mitattavan kappaleen suhteen ovat tiedossa, voitaisiin muunnos koordinaatistojen avulla suorittaa GPS-havaintojen avulla. Tässä työssä mitattua pisteistöä ei tarkastella toisessa koordinaatistossa, joten absoluuttisen orientoinnin sisältämää 3D-yhdenmuotoisuuksien muutosta ei ole syytä avata.

2.3 Digitaalikuviin virhelähteet ja korjaukset

Mittausprosessissa on huomioitava useita virhelähteitä, jotka voivat liittyä koko mittausjärjestelmään, mutta fotogrammetrian kannalta tarkasteltuna merkittävimmät virhelähteet ovat peräisin kamerajärjestelmästä ja ne saadaan tunnistettua kameran kalibroinnissa ja korjattua laajentamalla laskennassa käytettävää matemaattista mallia lisätermillä.

Kalibroinnissa selvitetään sisäisen orientoinnin parametrit, joita ovat kameravakio c , pääpisteen koordinaatit (x_0, y_0) sekä optiikan aiheuttamat piirtovirheet, kuvavääristymät eli ortogonaalisuus- ja affiinisuuksitermit sekä kennon mahdollinen poikkeama tasosta. Optiikan piirtovirheet koostuvat symmetrisestä säteittäisestä piirtovirheestä (radiaalinen

piirtovirhe) ja epäkeskisyyspiirtovirheestä, jotka ovat seurausta optiikan epätäydellisyydestä. Tässä epätäydellisyydellä tarkoitetaan poikkeamaa neulansilmäperiaatteesta, jonka mukaan kaikki kuvasäteet kulkevat saman projektiokeskuksen kautta ilman, että säteen taittumista tapahtuu. Käytännössä neulansilmäperiaate ei toteudu koskaan, vaan optiikalla pyritään pääsemään lähelle tätä tapausta. Linssijärjestelmässä tapahtuvaa säteen taittumista kompensoidaan laajentamalla kollineaarisuusyhtälöitä lisäämällä niihin korjausparametreja. Kuva 6 havainnollistaa radiaalisen piirtovirheen vaikutusta kuvan vääristymiseen. Vääristymä voi olla joko tynnyri- tai neulatyynyvääristymä, mutta niille yhteistä on, että niiden vaikutus on yleisesti ottaen suurin kuvan reunoilla ja aina symmetrinen pääpisteen suhteen.

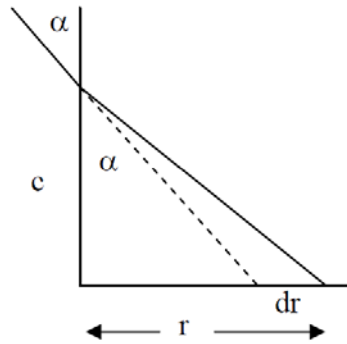


Kuva 6: Säteettäisen piirtovirheen vaikutus kuvaan (Stolkin 2007)

Symmetrinen säteittäinen piirtovirhe dr määritellään

$$dr = r - ctan\alpha \quad (1)$$

Missä α on säteen tulokulma.



Kuva 7: Säteittäisen piirtovirheen määrittely (Inkilä 2012a)

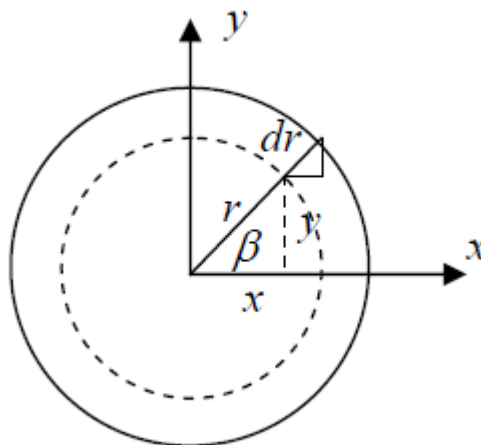
Säteittäinen piirtovirhe dr voidaan mallintaa polynomimallilla

$$dr = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots \quad (2)$$

missä $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$. Yleisesti ottaen maksimissaan kolme K_i parametria riittää säteittäisen piirtovirheen aiheuttaman virheen korjaamiseen. Säteittäisen piirtovirheen dr x- ja y- komponentit ovat

$$dx_1 = dr \cos \beta = x \frac{dr}{r} \quad (3)$$

$$dy_1 = dr \sin \beta = y \frac{dr}{r}$$



Kuva 8: Optiikan aiheuttama symmetrinen säteittäinen piirtovirhe (Inkilä 2012a)

Piirtovirhe dr on riippuvainen kameravakiosta c , minkä takia piirtovirhe on nolla oikein valitulla r :n arvolla r_0 . Säteittäinen piirtovirhe riippuu myös fokuksinnista, eli kohteen etäisyydestä ja jos tunnetaan piirtovirhe kahdelle eri etäisyydelle, voidaan se laskea mille tahansa etäisyydelle.

Toinen optiikan piirtovirhe on osaoptiikan epätäydellisen keskistykseen seurausta. Tämä piirtovirhe tunnetaan epäkeskisyyspiirtovirheenä ja sen tangentialinen profiilifunktio on

$$P(r) = J_1 r^2 + 2r^4 + \dots \quad (4)$$

Conradyn mallin (Brown 1966) mukaan epäkeskisyyspiirtovirheen radiaalinen komponentti dr ja tangentialinen komponentti dt pisteessä x, y (φ, r) ovat:

$$dr = 3P(r) \sin(\varphi - \varphi_0) \quad (5)$$

$$dt = P(t) \cos(\varphi - \varphi_0)$$

jossa φ on positiivisen x -akselin ja paikkavektorin r välinen kulma ja φ_0 on x -akselin ja suurimman tangentialisen piirtovirheen akselin välinen kulma.

Komponentit x - ja y - suunnissa ovat

$$dx_2 = -P \left\{ \left(1 + 2 \frac{x^2}{r^2} \right) \sin \varphi_0 - 2 \frac{xy}{r^2} \cos \varphi_0 \right\} \quad (6)$$

$$dy_2 = -P \left\{ 2 \frac{xy}{r^2} \sin \varphi_0 - \left(1 + 2 \frac{y^2}{r^2} \right) \cos \varphi_0 \right\}$$

Määrittämällä $P_1 = -J_1 \sin \varphi_0$, $P_2 = J_1 \cos \varphi_0$, $P_3 = J_2/J_1$, $P_4 = J_3/J_1$, ... Conradyn malli voidaan kirjoittaa

$$dx_2 = [P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy][1 + P_3r^2 + P_4r^4 + \dots] \quad (7)$$

$$dy_2 = [2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)][1 + P_3r^2 + P_4r^4 + \dots]$$

Kahden ensimmäisen parametrin P_1 ja P_2 huomioiminen riittää yleensä ja kun nämä on ratkaistu, voidaan tarvittaessa ratkaista J_1 ja φ_0 kaavoilla

$$J_1 = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \quad \text{ja} \quad \varphi_0 = \arctan(-P_1/P_2) \quad (8)$$

Kuten radiaalinen piirtovirhe, myös epäkeskisyyspiirtovirhe riippuu kameran fokusoinnista ja se voidaan eliminoida täysin tietyllä kuvausetäisyydelle s .

Edellä mainittujen linssijärjestelmän lisäksi pikselin skaalaus x - ja y -suunnissa saateen joutua ottamaan huomioon ja sen korjaustermi on muotoa

$$dx_3 = B_1x + B_2y \quad (9)$$

Kennon poikkeama tasosta on käsitteenä syytä pitää mielessä, vaikka digitaalikuvausteknologian jo kypsyttyä voidaan tätä virhelähdettä pitää häviävän pienenä ja epätodennäköisenä, minkä takia esimerkiksi Sampath ym. (2012) ei ole ottanut tätä kameran itsekalibrointia käsittelevässä julkaisussaan lainkaan huomioon.

Lisäämällä luvussa 2.1.2 esitettyyn kollineaarisuusehtoon (5) edellä kuvatut korjausparametrit (7), (10) ja (13), saadaan matemaattiseksi malliksi

$$\begin{cases} x - x_0 = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + dx_1 + dx_2 + dx_3 \\ y - y_0 = -c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + dy_1 + dy_2 \end{cases} \quad (10)$$

Kameran kalibroinnin voi suorittaa monella tavalla, jotka Inkilä (2012b) on jakanut kolmeen pääryhmään:

1. Komponentti-/laboratoriokalibrointi
2. Testikenttäkalibrointi

3. Itsekalibrinti

Kalibrintimenetelmän valinta riippuu käytettävästä kamerajärjestelmästä sekä sovel-luskohteesta. Tässä työssä kalibrinti suoritetaan iWitness-ohjelmistolla käyttäen apuna värikoodattuja tähyksiä (kuva 9). Kalibrinti tapahtuu automaattisesti, mikäli valaistus-olosuhteet kalibroinnin aikana ovat kyllin hyvät ja koodatut tähykset saadaan tunnistet-tua kuvilta. Huonossa valaistuksessa otettujen kalibrintikuvien kontrastia ja kirkkautta on säädettävä, jotta ohjelma pystyy tunnistamaan keskenään erilaiset tähykset luotetta-vasti. Oikean kontrastisuhteen löytäminen kalibrintikuville voi olla työläs tehtävä etenkin, jos kuvia on paljon, joten iWitnessin uudemmissa versioissa kalibrintikuvien kynnystysarvo voidaan säätää kalibroinnin yhteydessä, mikä nopeuttaa kalibrintia ja auttaa välttämään työlään kuvanmuokkausprosessin.

2.4 Kameran itsekalibrinti

Perinteisesti kameran kalibrinti on perustunut tunnetun kolmiulotteisen kohteen tai liikkeen mittauksiin, mutta jopa tuntematon kohde tuntemattomalla kameran liikkeellä sisältää kalibrintiin tarvittavan informaation. Itsekalibroinniksi kutsutaan menetelmää, jossa kameran kalibrinti ja liike palautetaan tuntemattomasta kohdenäkymästä käyttäen hyväksi kohteen ”jäykkyyttä” (eng. rigidity) (Triggs 1997).

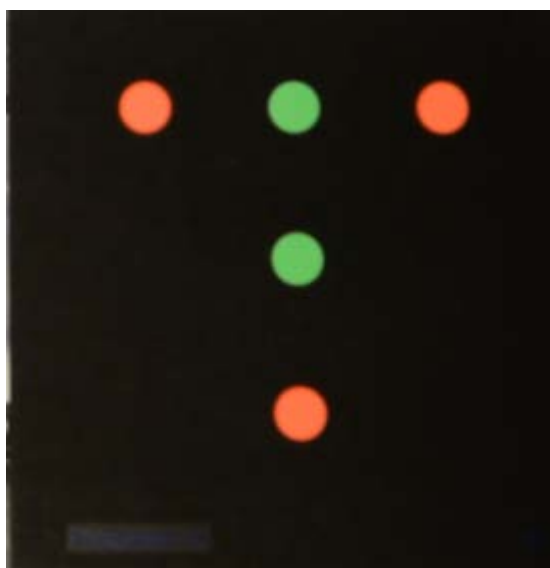
Tässä työssä ei konkreettisesti luoda kalibrintiprosessia, tai suoriteta digitaalisen kalib-rintiin liittyviä kuvankäsittelyn operaatioita kuten piirreirrotusta, sillä nämä operaatiot tapahtuvat iWitnessissä automaattisesti. Koska kameran kalibrinti on mittaamisen tarkkuuden kannalta kuitenkin olennainen tehtävä, on siihen liittyviä operaatioita syytä avata. Kalibroinnissa ratkaistaan kameran sisäisen orientoinnin parametrit sekä luvussa 2.3 kuvatut radiaalinen- ja epäkeskisyyspiirtovirhe. Muun muassa Inkilä (2012b) on käynyt läpi eri kalibrintimenetelmiä, mutta koska menetelmänä kameran itsekalibrinti on nopea ja robusti sekä käytössä tämän työn mittausprosessissa, keskitytään itsekalib-rimentelmään sen sisältämine vaiheineen.

Cronk ym. (2006) ovat tutkineet kameran itsekalibrintimenetelmää, jota iWitnessissä käytetään. Tutkimuksessa on kaksi selkeää vaihetta:

1. oikeanlaisen kalibrintitähyksen määrittely

2. uusi lähestymistapa keskinäisen orientoinnin lähtölikiarvojen määrittämiseen. Lähtölikiarvojen avulla verkon ulkoinen orientointi ja sitä seuraavaa sädekimp-putasoitus saadaan ratkaistua.

Koodattuja kalibrointitähyksiä on ollut käytössä jo pitkään, mutta ne ovat olleet lähinnä mustavalkoisia, mikä asettaa vaatimuksia tähysten kuvion monimuotoisuudelle, jotta yksilöityjä tähyksiä voidaan valmistaa tarpeeksi. Mustavalkoiset tähykset eivät myöskään hyödynnä kameroiden väri-informaatiota. (Cronk ym. 2006)



Kuva 9: Värikoodattu kalibrointitähyks

Cronk ym. (2006) ovat tutkineet kameroiden automaattista kalibrointia käyttäen hyväksi kuvien sisältämää väri-informaatiota. Syy kuvan 9 kaltaiseen puna-vihreä-väriyhdistelmään selittyy digitaalisten värikuvien muodostusperiaatteella: kaikki digitaalikuville nähtävät värit ovat punaisten, sinisten ja vihreiden pikseleiden yhdistelmiä. Taustavärin puolestaan on syytä olla musta, sillä se ei sisällä lainkaan väri-informaatiota toisin kuin valkoinen, joka sisältää maksimimäärän punaista, vihreää ja sinistä, jolloin yksittäisen värin erottaminen taustasta on tietokoneelle vaikeampaa.

Potentiaalisia tähyksiä Cronk ym. (2006) tutkivat ottamalla kuvia erilaisista tähysvaihtoehdoista ja vertailemalla kameroiden CCD-kennojen antamaa vastetta erivärisille kohteille. Punaisen ja vihreän huomattiin tutkimuksissa antavan paremman vasteen ja osasyysiksi paljastui sinisen taipuvuus sekoittua mustaan taustaan. Samalla Cronk ym.

(2006) huomasivat eri CCD-kennojen antavan keskenään samankaltaisia vastearvoja, joten kuvauskaluston valinnalla ei näin ollen ole merkitystä tähystyypin valintaan. Parhaan väriyhdistelmän lisäksi tähyksen suunnittelussa on otettava huomioon kuvio tai malli, jolla saadaan muodostettua riittävän monta yksilöllistä ja yksiselitteistä tähyistä, joista lopullinen kalibroitikenttä muodostetaan. Cronk ym. (2006) päätyivät kuvan 9 mukaiseen ”T”- kuvioon, jossa on viisi värikohdetta. Koska värejä on kaksi ja tähyksessä kohteita 5, saadaan yksilöllisten tähysten lukumääräksi $2^5 = 32$. Lisäksi tähyks on suunniteltu siten, että kaksi vierekkäistä väritäplää sijaitsevat aina keskenään yhtä kaukana toisistaan, joten tähyks on skaalattavissa, ja kuvattava kohde sekä käytettävä kalusto määrittelevät minkä kokoisia tähyksiä käytetään. Lähifotogrammetriseen itsekalibrointiin Cronk ym. (2006) suosittelevat käyttämään n. 10cm x10 cm tähyksiä, jolloin niistä saadaan muodostettua kuvanäkymään mahtuva tähyksjoukko, joista saadaan iWitnessin 12 tähyksen muodostaman kalibroitikentän tapauksessa yhteensä 60 (5×12) havaintoa, joiden pitäisi riittää kameran kalibrointiparametrien selvittämiseen.

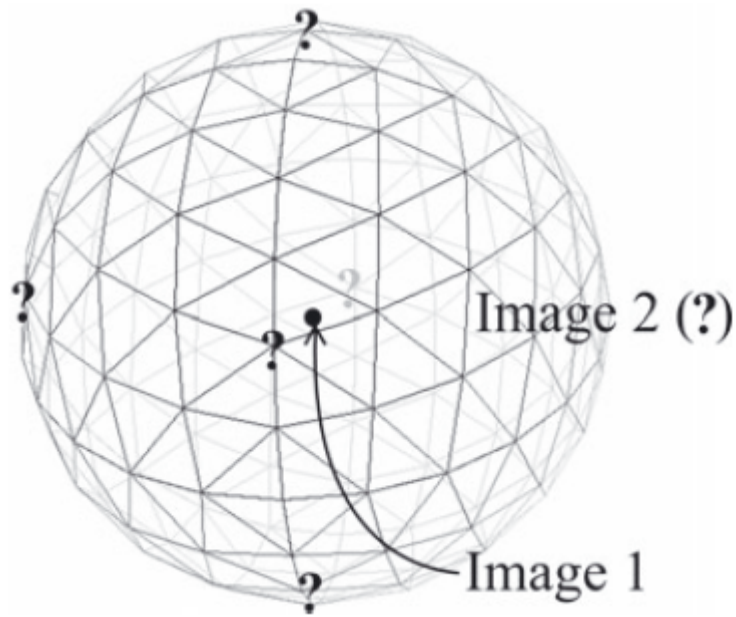
Algoritmi, jolla tähykset tunnistetaan, on Cronkin ym. (2006) mukaan nopea, robusti ja täysin automatisoitu. Algoritmi käy ensin läpi kuvan ja tunnistaa siltä väriläiskät, minkä jälkeen klusterointiprosessissa tutkitaan havaittujen vihreiden ja punaisten täpliä läheisyyden perusteella voivatko tunnistettujen kohteiden muodostama pistejoukko kuulua johonkin ennalta määrätyistä tähyksistä. Algoritmi käy tämän jälkeen läpi potentiaaliset pistejoukot ja tutkii klusteroidun viiden pisteen väliset kulma- ja spatiaaliset suhteet ja vertaa näitä tunnettuun ”T”- malliseen tähykseen. Havaitut pisteistöt, jotka eivät täytä haluttua tunnusmerkistöä hylätään.

Kun kaikki tähykset on tunnistettu kuvilta, niiden sisältämien värikoodien kaksiulotteiset paikkakoordinaatit tallennetaan tunnistamalla jokaisen väritäplän keskikohta perustuen niiden intensiteettiarvoihin. Kun otetut kuvat on käyty läpi ja koodattujen tähyspisteiden kuvakoordinaatit laskettu, seuraava vaihe kalibrointiprosessissa on suorittaa alustava ulkoinen orientointi, jonka ratkaiseminen alkaa kahden kuvan välisen keskinäisen orientoinnin selvittämisellä. Cronk ym. (2006) mukaan tässä on huomioitava kaksi asiaa:

1. Mitkä kaksi kuvaa kalibrointikuvien joukosta valitaan keskinäiseen orientointiin

2. Keskinäisessä orientoinnissa käytettävien lähtölikiarvojen määrittäminen, samalla ratkoen epälineaariset kollineaarisuusyhtälöt PNS-menetelmällä.

Kuvien joukosta valitaan parhaiten sopiva kuvapari, joka on värikoodattujen tähysoikeuksien mittausten perusteella valittu perspektiiviltään mahdollisimman erilainen kuvapari. Keskinäisen orientoinnin ratkaisu perustuu epälineaarisin koplanariteettiyhtälöihin, joiden ratkaiseminen huonoilla lähtölikiarvoilla ja vaikealla kuvausgeometrialla on hankalaa. Keskinäisen orientoinnin parametrien lähtölikiarvojen epälineaarinen määrittäminen epipolaarimatriisiin E , tai fundamentaalimatriisiin F avulla on todettu olevan epävarmaa, joten Cronk ym. (2006) esittävät likiarvojen määrittämiseksi joustavan ja robustin automatisoidun itsekalibrointimenetelmän, jonka nykyaikaisen tietotekniikan laskentateho mahdollistaa. Tutkijat ovat päätyneet *Monte Carlo*-tyyppiseen strategiaan, jossa suuri määrä mahdollisia keskinäisen orientoinnin ratkaisuvaihtoehtoja kuvapareille käydään läpi. Metodissa ensimmäisen kuvanottopaikan ympärille simuloidaan kolmiulotteinen tesseloitu pallo (kuva 10), jonka jokainen solmukohta toimii mahdollisena toisena kuvanottopaikkana. Jokaisessa solmukohdassa mahdolliselle kuvanottopaikalle simuloidaan ulkoisen orientoinnin parametrit ja pienimmän neliösumman ratkaisu saadaan koplanariteettiyhtälön avulla. Keskinäisen orientoinnin mahdollisista ratkaisuista tallennetaan lista, josta valitaan ”kaikista mahdollisin” eli sellainen, jolla on pienimmät rms-arvot kuvakoordinaattien residuaaleille ja joka täyttää kuvanottopaikalle tietyt geometriset ehdot, kuten sen, ettei kohde sijaitse kuvanottopaikan takana.



Kuva 10: Kuvanottopaikan ympärille simuloitu tesseloitu pallo.(Cronk ym. 2006)

Edellä kuvatun menetelmän on todettu olevan erittäin robusti tapa selvittää keskinäisen orientoinnin lähtölikiarvot, mutta se on laskennallisesti erittäin vaativa ja sen takia ollut mahdollinen vasta nykyaikaisella tekniikalla. (Cronk ym. 2006). Alustavaa keskinäistä orientointia varten on tärkeää selvittää kameravakio c , jonka voi lukea otetun kuvan EXIF-tunnisteesta, tai arvioida perustuen oletettuun kameran avauskulmaan ja kuvan pikselikokoon. Kameravakio voidaan myös selvittää antamalla arvio polttovälistä, joka kokeilujen perusteella tarvitsee arvioida 50% tarkkuudella, jotta kameravakio saadaan selville. Muut kameraparametrit voidaan olettaa nolaksi keskinäisessä orientoinnissa ja alustavassa ulkoisen orientoinnin vaiheessa. (Cronk ym. 2006). Loppujen kalibrointikuvien orientointi voidaan laskea spatiaalisella leikkauksella käyttäen hyväksi kolmioituja kohdekoordinaatteja. Tämän jälkeen täysi alustava ulkoinen orientointi on suoritettu koko verkolle ja jäljelle jää enää lopullinen itsekalibroituva sädekimpputasoitus, jolla lopulliset arvot parametreille ratkotaan.

Sädekimpputasoitus tapahtuu Cronk ym. (2006) mukaan kolmessa iterointivaiheessa, joista ensimmäiseen tarvitaan vain tieto kameravakiosta. Toisella iteraatiokierroksella sisäisen orientoinnin parametrejä käsitellään tuntemattomina ja kolmannen iteroinnin tuloksena saadaan selvitettyä sisäisen orientoinnin parametrit mukaan lukien radiaalista piirtovirhettä kuvaavat parametrit K_1, K_2 & K_3 . Lähifotogrammetriassa kameran kalib-

rintia varten on muodostettu erilaisia kameramalleja, joista Brownin (1971) esittämä itsekalibrointimenetelmä pitää yhä puoliaan optimaalisena digitaalikameran kalibrointimenetelmänä (Remondino & Fraser 2006). Toisaalta edellä on kuvattu menetelmä, jossa kameran kalibrointi on suoritettu erillisenä operaationa sädekimpputasoitukseen integroidun itsekalibroinnin sijasta. (Cronk ym. 2006) Seuraavaksi käsitellään tarkemmin sädekimpputasoitusta, joka tarjoaa samanaikaisen systeemin parametrien ratkaisun ja arvion saatujen kalibrointiparametrien tarkkuudelle ja luotettavuudelle.

2.5 Sädekimpputasoitus

Fotogrammetrian saralla sädekimpputasoitus on hyvin tunnettu ja paljon tutkittu estimointitehtävä, jonka eri osat on kehitetty viimeisen kahden vuosisadan aikana. Sädekimpputasoituksen kehitys voidaan katsoa alkaneen Gaussin vuonna 1823 (Gauss, 1995) julkaisemasta erikoistutkielmasta, joka sisälsi jo lähes koko modernin pns-teorian mukaan lukien teoreettisen Gauss-Newton iteraation epälineaaristen optimointitehtävien tehtävien ratkaisemiseksi. Teorian kannalta tärkeää kehitystä tapahtui 1800 ja 1900-luvuilla, mutta vasta 1950-luvulla tietokoneet mahdollistivat isojen pns-tehtävien ratkaisemisen ja 1960-luvulla sädekimppumenetelmiä alettiin valjastamaan lähifotogrammetrian tarpeisiin.

Lähifotogrammetrian kannalta sädekimpputasoitus on tehtävä, jossa optimoidaan samanaikaisesti 3D-rakenne ja kameraparametrit visuaalisessa rekonstruktiossa. Termi sädekimppu viittaa kolmiulotteisista kohdepisteistä kameran projektiokeskukseen viritettyihin säteisiin, joita menetelmässä säädetään – tai tasoitetaan – optimaalisesti kohteen ja kameroiden asentojen suhteen. Visuaalisessa rekonstruoinnissa kuvilta pyritään palauttamaan kohdetta vastaava kolmiulotteinen malli, ja samalla saadaan usein ratkaistua kuvanottopaikat, kameroiden sisäiset parametrit ja kameroiden asennot. Sädekimpputasoitus on Triggsin ym. (2000) mukaan suuri ja harva geometrinen parametrien estimointitehtävä, jossa edellä mainittuja kameran ja kohteen parametreja estimoidaan. Sädekimpputasoituksen erityispiirteenä on se, että kohteen rakenne ja kameraparametrit tasoitetaan yhdessä operaatiossa. Menetelmä on separoituva 3D rakenteen ja kameroiden suhteen ja tätä ominaisuutta on hyödynnetty Cronk ym. (2006) esittelemässä kalibrointiprosessissa, jossa ennen lopullista sädekimpputasoitusta kameralle suoritetaan alustava

kalibrointi. Sädekimpputasoitus on epälineaarisen ja vaatii toimiakseen hyvän kuvausverkon geometrian, joka saavutetaan ottamalla kuvat kolmiulotteisesta kohteesta erilaisilla kameran kierroilla, niin että kuvattavat kohdepisteet sijaitsevat mahdollisimman laajasti koko kuvatasolla. Kuvien muodostaman verkon huono geometria voi johtaa havaintojen tasoitukseen käytetyn menetelmän (esimerkiksi pienimmän neliösumman tasoitus) epästabiiliuuteen, mikä tarkoittaa sitä, että pieni muutos havaintovektorissa aiheuttaa suuren muutoksen parametrivektorissa. (Ellis 1998; Inkilä 2012d).

Sädekimpputasoitus voidaan koota monella eri tavalla, sillä se koostuu monesta mallista ja menetelmästä, joiden valintaan voidaan vaikuttaa. Triggs ym. (2000) mukaan sädekimpputasoitusta implementoidessa on huomioitava yleisesti suuriin optimointitehtäviin liittyviä asioita:

1. Hyödynnetään tehtävän rakenne: Sädekimpputasoitus on rakenteeltaan hyvin jäsenNELTY ja harva, mitä tulee käyttää hyväksi laskennassa. Jos suoritetaan sädekimpputasoitus tilanteessa, jossa kuvia ja piirteitä on paljon, ei parametrien ratkaisu olisi mahdollinen ilman harvan rakenteen hyödyntämistä.
2. Käytetään hajotelmaa tehokkaasti: Laskennassa käytettyjä matriiseja voidaan käsitellä esimerkiksi Choleskyn menetelmällä, joka on tehokas suora ratkaisumenetelmä. (Inkilä 2012a) Optimointi-iteroinnin kannalta hajotelma on tärkeässä roolissa ja sillä voidaan säästää aikaa ja parantaa menetelmän tehokkuutta.
3. Parametrisoinnin tulisi olla äärellinen, yhtenäinen ja paikallisesti mahdollisimman lähellä lineaarista. Globaali parametrisointi ei onnistu johtuen tehtävän epälinearisesta luonteesta.
4. On tärkeää valita tehtävän rakenteen mukaan muuttuva skaalaus. Tämä tarkoittaa vertailua esimerkiksi virheen suhteellisesta vaikutuksesta lähellä tai kaukana olevaan kohdepisteeseen. Skaalaamiseen Triggs ym. (2000) ehdottavat käytettävän ideaalista painomatriisia.

Sädekimpputasoitus toimii parhaiten tilanteessa, jossa kuvattava kohde poikkeaa tasosta, kuvien peitto on suuri ja kuvat on otettu hyvällä geometrialla. Muunneltavuutensa ansiosta sädekimpputasoitus toimii myös lähes tasomaista kohdetta kuvattaessa ottamalla tasoitukseen mukaan lisärajoitteita, joilla ulkoisen orientoinnin parametrien korrelaation ja tasomaisen kohteen geometrian vaikutus virheen lisääntymiseen saadaan kontrol-

loitua. (Zhang ym. 2012) Sädekimpputasoitusta käsittelevien tutkimusten perusteella voidaan menetelmän todeta toimivan hyvin jopa haasteellisissa lähifotogrammetrisissa mittauksissa.

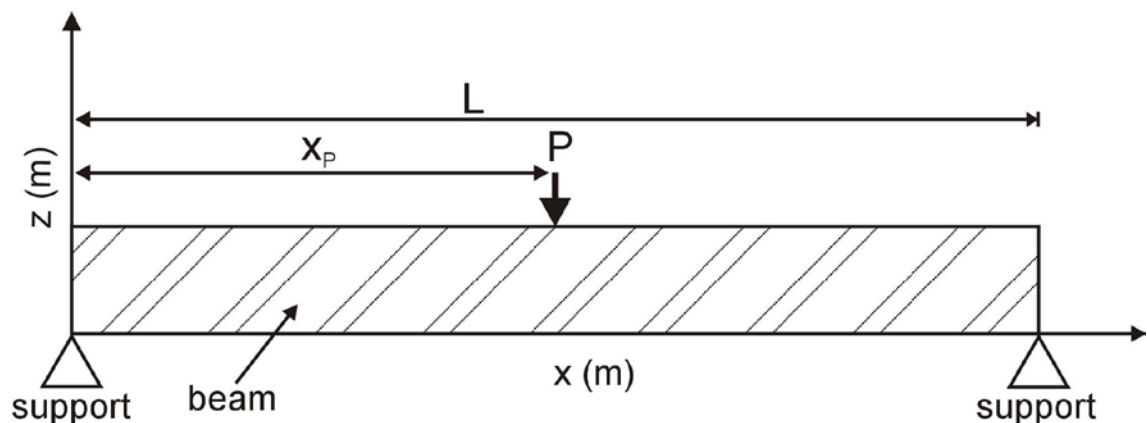
3 Deformoituvan kappaleen muodonmuutosmittaus

Kolmiulotteisen kohteen mallintamiseen on olemassa monia menetelmiä, joiden soveltuvuus eri tilanteissa voi vaihdella. Kohteen koko, muoto ja mittaussympäristö asettavat rajoitteita menetelmän valinnalle; yhdessä tilanteessa parhaaksi todettu mittausmenetelmä ei välttämättä ole mahdollinen tai mielekäs käyttää toisessa tilanteessa. Kappale, joka tässä työssä mallinnettiin, oli kooltaan ja muodoltaan sellainen, että se olisi ollut mahdollista mallintaa laserkeilaimella tai fotogrammetrisin menetelmin, sillä kohteesta tuli saada muodostettua nopeasti mittatarkka 3D-malli kappaleeseen koskematta. Laserkeilaimen käyttäminen kolmiulotteisen kohteen mittaamiseen on saanut huomiota lähi-aikoina menetelmän useiden etujen ansiosta. Tsakiri ym. (2006) ovat luetelleet laserkeilaimella mittaamisen eduiksi muun muassa kolmiulotteisen, tarkan ja tiheän pistepilven mittaamisen sekä menetelmän toimimisen ilman tähysten käyttöä. Rönholm ym. (2009) mukaan yksittäisen pisteen mittaustarkkuus on keskiverto, mutta kokonaisen 3D pistepilven keskiarvon tarkkuus riittää muodonmuutoksen mittaamiseen. Laserkeilaus on pitkälti automatisoitu menetelmä, vaikka kerätyn datan prosessointia varten joitakin toimintoja on tehtävä käsin. Kun laserkeilausta verrataan fotogrammetriaan, voidaan myös kuvamittauksen keinoin mitata tarkasti tiheä pisteistö, mikä tosin vaatii työlään esivalmistelun, jossa mallinnettavaa kappaletta näkyvöitetään tähyksillä. Toisaalta tämän työn puitteissa tarvittiin tarkkoja mittaustuloksia vain muutamista kohdepisteistä ja vaikka laserkeilaimen käyttäminen mittauksessa vaikuttikin hyvältä vaihtoehdolta, liittyi sen käyttöön tämän työn mittaustilanteessa kuitenkin esteitä, jotka käydään seuraavaksi läpi.

3.1 Muodonmuutosmittaus laboratorio-olosuhteissa

Ihmisen valmistamien suurien rakenteiden suunnittelu pohjautuu pitkälti käytettävistä materiaaleista olemassa olevaan informaatioon, joka on saatu selville kokeellisesti testaamalla pieniä otosjoukkoja sekä yksinkertaistamalla rakenteen geometrisia ominaisuuksia ja rakenteellisten elementtien käyttäytymistä. Laboratorio-olosuhteissa suoritettavat muodonmuutosmittaukset ovat erittäin hyvä työkalu teoreettisten suunnittelumallien validoimiseksi. (Tsakiri ym. 2004) Terrestriaalisen laserkeilaimen käyttäminen kohteiden mallintamiseksi on tullut lähivuosina hyväksytyksi menetelmäksi, mutta huolimatta

menetelmän potentiaalista, on sitä käytetty vasta vähän rakenteiden muodonmuutosmittauksissa. (Rönholm ym. 2009),(Tsakiri ym. 2006). Tässä työssä mitattiin noin 25m pitkä ja noin 8m leveä metallirunko, jonka mittaustarkkuudeksi oli asetettu $\pm 4mm$. Tämän lisäksi rungon mahdollinen taipuma kuormitettaessa oli saatava mitattua, erityisesti pitkittäisen palkin keskikohdasta. Kuvatus kaltaisessa tilanteessa laserkeilaimen käyttäminen palkin ja sen muodonmuutoksen mallintamiseen voisi olla perusteltu, sillä laserkeilaimella saadaan mitattua tiheä pisteistö millimetritasolla mittaustäisyyksien ollessa alle 10m. (Gordon ym. 2012). Kappaleen muodonmuutosta on mitattu samankaltaisin järjestelyin laboratorio-olosuhteissa monen tutkijaryhmän toimesta (Gordon ym. 2004; Rönholm ym. 2009; Tsakiri ym. 2004) Näissä tutkimuksissa eri materiaaleista valmistettuja erikokoisia kappaleita tuettiin päistä ja kuormitettiin keskikohdasta erisuuruisilla voimilla. Kaikissa tutkimuksissa käytettiin useampaa mittaustapaa ja eri metodeilla saavutettuja mittaustuloksia verrattiin johonkin referenssiaineistoon, joka pohjautui teoreettiseen tietoon kappaleesta tai oli tuotettu jollain toisella menetelmällä. Kuva 11 esittää yksinkertaistettuna edellä mainittujen ryhmien mittaustilanteen. Rönholm ym. (2009) tosin kuormittivat kappaletta kahdella hydraulitunkilla läheltä kappaleen keskikohtaa.



Kuva 11: Puupalkin kuormitus (Gordon ym. 2004)

Gordon ym. (2004) ovat tutkineet kahden alle kymmenmetrisen palkin taipumista laboratorio-olosuhteissa käyttäen kahta eri laserkeilainta, Cyra Cyra 2500:a (UPC, 2015) ja Riegl LMS-Z210:ä. Mittaustuloksia verrattiin teorian pohjalta tuotettuun malliin ja kontrollidata tuotettiin fotogrammetrisesti. Kuvassa 11 on havainnollistettu koetilannetta, jossa puupalkkia kuormitetaan keskeltä ja palkki laserkeilataan. Verrattaessa laser-

keilaimia keskenään, Cyra Cyrax 2500 mittaa 3D pisteitä 1000Hz taajuudella pisteittäisen tarkkuuden ollessa $\pm 6\text{mm}$. Riegl LMS-Z210 on nopeampi (6000Hz) mutta epätarkempi ($\pm 25\text{mm}$). Ensimmäinen mallinnettava kappale oli $5,2\text{m} \times 0,2\text{m} \times 0,1\text{m}$ puinen palkki, joka oli tuettu molemmista päistä ja kuormitettu keskeltä niin, että palkin keski-kohta taipui maksimissaan 40mm. Laserkeilaimet asetettiin mittaamaan palkkia 5-6 metrin etäisyydelle kahdeksi tunniksi, minkä aikana palkkia taivutettiin keskeltä viisi millimetriä kerrallaan, kunnes kokonaistaipuma 40mm oli saavutettu. Jokaisen tilanteen välillä palkki laserkeilattiin ja kummankin keilaimen keräämää dataa verrattiin fotogrammetrisesti mitattuun kontrollidataan, jonka mitattu tarkkuus oli $\pm 0,14\text{mm}$ X-, $\pm 0,15\text{mm}$ Y- ja $\pm 0,04\text{mm}$ Z-suunnassa, joista viimeinen on muodonmuutosmittauksen kannalta olennaisin. Mittaustulosten mukaan Cyrax 2500:lla mitattujen pisteiden keskimääräinen virhe (RMS) oli $\pm 0,29\text{mm}$ ja Riegl LMS-Z210:lla puolestaan $\pm 3,6\text{mm}$ verrattuna fotogrammetrialla tuotettuun mittausaineistoon. Betonipalkin muodonmuutosmittauksessa ei ollut käytössä kuin Riegl LMS-Z210, jonka mittaustarkkuus oli hieman parempi ($\pm 2,4\text{mm}$) kuin puupalkin muodonmuutosta mitattaessa. (Gordon ym. 2004)

Tsakiri ym. (2004) ovat myös tutkineet laboratorio-olosuhteissa puupalkin muodonmuutosta käyttäen mittaukseen fotogrammetrista ja geodeettista menetelmää. Koejärjestelyt muistuttivat Gordon ym. (2004) järjestelyjä; puupalkki oli tuettu molemmista päistä ja kuormitettu keskeltä, tosin kokonsa puolesta mitattava puupalkki oli pienempi: $1,5\text{m} \times 0,14\text{m} \times 0,07\text{m}$. Palkkiin oli kiinnitetty 140 tähystä, minkä lisäksi paikallaan pysyvään ympäristöön oli kiinnitetty 17 tähystä, jotka toimivat referenssipisteinä datumin määrittelyssä sekä tukipisteinä kuvamittauksessa. Palkin taipumaa mitattiin kolmella eri kuormituksella (8, 12, & 23 kN), ja mitattuja taipumia verrattiin lepotilassa mitattuun tilanteeseen. Geodeettiseen mittaukseen käytettiin kahta Leican valmistamaa takymetriä TC1600 ja TC1800, jotka sijoitettiin noin kahden metrin päähän mitattavasta palkista. Kuvamittaus suoritettiin ottamalla lepotilasta ja jokaisesta kuormitusilanteesta Sony DSC-F707- digitaalikameralla yhdeksän kuvaa, joista seitsemän otettiin kohtisuorassa palkkiin nähden 70 % peitolla ja 0,25m kuvakannalla ja kaksi vinokuvaa palkin päistä 30° kulmalla. Jokaisessa neljässä kuvaussarjassa suoritettiin erikseen yhdistetty kuvakolmiointi ja itsekalibrointi. Arvioitu pisteiden tarkkuus oli luokkaa $\pm 3\text{mm}$ ja ero takymetrillä mitattuihin pisteisiin luokkaa $\pm 2\text{mm}$. Molemmilla menetelmillä saatuja mit-

taustuloksia verrattiin Wood Handbookin (1987) avulla muodostettuun rajallisten elementtien malliin (eng. Finite element model) ja tulokset osoittautuivat olevan keskenään lähellä toisiaan. Tsakiri ym. (2004) toteavatkin molempien mittausmenetelmien tuottavan tarkkaa mittausdataa, mutta huomauttavat takymetrimittauksen olevan hidas ja mitauspisteistöltä rajattu menetelmä. Tutkimusryhmä totesi, että fotogrammetrisella menetelmällä palkin taipuma voitiin mallintaa $\pm 1\text{mm}$ tarkkuudella. On huomioitava kuitenkin, että uudemmalla kalustolla suoritettu fotogrammetrinen mittaus samankaltaisissa olosuhteissa oli tarkkuudelta $\pm 0,37\text{mm}$, kun tuloksia verrattiin tarkkana pidettyyn mekaanisesti mitattuun dataan.

Gordon ym. (2004) ja Tsakiri ym. (2004) tekemät tutkimukset ovat keskenään varsin vertailukelpoisia, sillä ne on tehty kertailukelpoista mittauskalustoa käyttäen samankaltaisissa säädellyissä olosuhteissa. Jotain johtopäätöksiä tutkimustuloksista voidaan vetää, sillä molemmissa tutkimuksissa käytetty fotogrammetrinen menetelmä riippumatta kamerasta tuotti tarkempia mittaustuloksia kuin Gordonin ym. (2004) käyttämä laserkeilain. Laboratorio-olosuhteissa suoritettut mittaukset sopivat hyvin rakenteiden muodonmuutoksen testaamiseen, mutta tarve jo olemassa olevien isojen rakenteiden muodonmuutosmittaamiseen on olemassa, sillä rakennuksia romahtaa vuosittain johtuen rakenteellisista virheistä tai ympäristön muutoksesta. (Rönnholm ym. 2009) Valmiiden rakenteiden muodonmuutoksen mittaaminen ei välttämättä ole mahdollista säädellyissä olosuhteissa, jossa mittalaitteiden sijoittelu olisi mahdollista tehdä parhaalla tavalla, vaan mittausympäristö ja rakenteen muoto sanelevat mittausmenetelmälle ehdot.

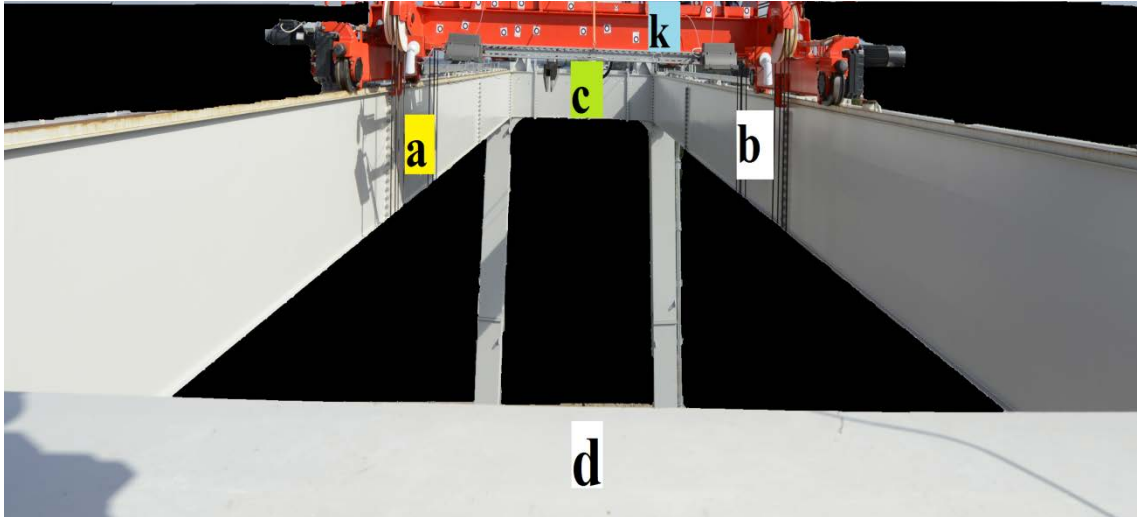
Gordon ym. (2004) mittasivat käytöstä poistetun puusillan taipumaa fotogrammetrisesti ja laserkeilaamalla mittausetäisyyksien ollessa noin 8-16:ta metriä. Laboratorio-olosuhteisiin verrattuna mittausetäisyydet olivat pidemmät, mittausajat lyhyemmät ja kohde heterogeenisempi rakenteeltaan ja materiaaliltaan, mikä teki rakenteen oletetun taipuman määrittämisestä teoreettisesti haastavamman. Fotogrammetrinen mittaus tuotti tuloksena korkeussuunnassa $\pm 0,4\text{mm}$ tarkkuuden mitatuille pisteille ja sillan todettiin taipuvan maksimissaan noin 8mm . Gordon ym. (2004) vertasivat fotogrammetrisiä tuloksia laserkeilaimella tuotettuun mittausdataan ja pisteittäinen ero oli $\pm 2,6\text{mm}$ ja $\pm 13,0\text{mm}$ välillä ja se kasvoi mittausetäisyyden kasvaessa. Ottaen huomioon laserkeilaimen laskennallisen tarkkuuden ja mitattujen taipumien suuruuden, Gordon ym.

(2004) toteavat, ettei laserkeilaimella onnistuttu mittaamaan siltarakenteen muodonmuutosta. Laboratorio-olosuhteissa laserkeilaimella saatiin kuitenkin mitattua tarkasti kappaleiden muodonmuutos, (Gordon ym. 2004) vaikka laserkeilaimella tuotettu data sisälsikin muita menetelmiä enemmän kohinaa. (Rönholm ym. 2009)

Laserkeilaimen tuottama data on kokonaisuudessaan erittäin tiheä pisteistö, joka on syvyysuunnassa erittäin tarkka verrattuna siihen, mitä fotogrammetrisella menetelmällä voidaan saavuttaa tilanteessa, jossa kuvausgeometria on huono. Tämän työn kuvausympäristö rajoitti kameroiden sijoittelua niin, ettei optimaalista kuvausgeometriaa käytännössä voitu saavuttaa, mikä osaltaan aiheutti sen, että syvyystarkkuus mitatuille pisteille oli huonompi kuin tarkkuus sivu- ja pystysuunnassa. Tämän työn mittauksittain tavoitteiden kannalta sivu- ja pystysuunnan tarkkuus olivat kuitenkin merkityksellisemmät, joten fotogrammetrista menetelmää voidaan pitää mittauksen tavoitteiden kannalta parempana tekniikkana kuin laserkeilausta. Laserkeilaimen käytölle tämän työn mittauksissa oli myös useita esteitä, sillä sen sijoittaminen tämän työn mittausympäristöön olisi ollut haastava tehtävä, minkä lisäksi laserkeilaimen ja mitattavan kohteen olisi pitänyt olla stabiilisti paikallaan sinä aikana, kun mittauksia suoritettiin, sillä kohteen tai keilaimen liikkuminen mittauksen aikana aiheuttaa virhettä mitatuille pisteille. Useamman kameran fotogrammetrinen menetelmä ei puolestaan kärsi samanlaisesta ongelmasta, jos kamerat on asetettu ottamaan kuvat samanaikaisesti, jolloin jokainen otettu kuva mallintaa tilanteen laukaisuhetkellä ja kuvien muodostamien pisteistöjen välille ei synny eroja. Staattisessa tilanteessa laserkeilaimella saadaan muodostettua tarkka pintamalli kohteesta ilman tarvetta tähytysten käytölle.

3.2 Mitattava kohde ja mittauskalusto

Mitattava kohde oli kuvan 12 mukainen kookas metallirunko, joka kuvattiin ensin ilman kuormitusta, minkä jälkeen runkoa kuormitettiin palkkien a ja b keskikohdasta ja kohde kuvattiin uudestaan kuormituksen aikana. Tarkoituksena oli tutkia, kuinka tarkasti kohteessa eri etäisyyksillä olevia 3D-pisteitä saatiin mitattua ja toisaalta kuinka tarkasti rakenteen muodonmuutos saatiin selvitettyä.



Kuva 12: Mitattava kohde

Kohteen muoto, kuvauskalusto ja kuvausympäristö asettivat rajoitteita kuvausgeometri-
aan, sillä kameroiden sijoittelu oli rajattu yhteen metallirungon sivuista, joka on merkit-
ty kuvaan d:llä. Muodonmuutosmittauksen kannalta palkit *a* ja *b* olivat kiinnostavim-
mat, sillä niiden oletettiin taipuvan kuormituksen aikana eniten. Palkkiin *c* oli kiinnitetty
noin puolet tähyksistä ja vaikka oletus olikin, ettei kuormitus juuri vaikuttaisi tämän
palkin muotoon, saatiin näiden tähysten avulla muodostettua tiheämpi ja tarkemmin
mitattu pisteistö, kuin mitä kohteessa luonnollisesti näkyvien piirteiden avulla olisi ollut
mahdollista saavuttaa. Loput tähyksistä oli kiinnitetty mobiiliin kelkkaan *k*, jotta pisteis-
töä saatiin tihennettyä entisestään ja toisaalta sen geometriaa parannettua tuomalla tä-
hyksiä kuvanäkymässä eri syvyyksille. Heikkinen (2005) on tutkinut kuvamittaukseen
vaikuttavia tekijöitä ja on nostanut esiin neljä asiaa, jotka 3D-mallin tarkkuuteen erityi-
sesti vaikuttavat:

1. kuvahavaintojen tarkkuus
2. kuvausgeometria
3. havaintojen lukumäärä ja
4. kameramallin oikeellisuus.

Tässä koetyössä oli huomioitava näistä erityisesti kolme ensimmäistä, sillä mittauska-
lusto oli valittava niin, että kameroiden kalibroinnit pysyivät muuttumattomina täärähte-
lyistä ja kaluston kuljettamisesta huolimatta. Käytännössä tämä tarkoitti vakaiden teolli-
suuskameroiden (kuva 13) käyttöä ja näiden resoluution ollessa 5mp, on ymmärrettä-

vää, ettei isossa kohteessa kameran erotuskyky laajalla avauskulmalla pysyisi riittävän hyvänä millimetritason mittauksiin. Tämän takia kameran optiikka oli säädettävä polttoväliltään mahdollisimman pitkäksi, jotta erotuskyky säilyi kyllin hyvänä, kun mittauksen välimatkat olivat kymmeniä metrejä. Toisaalta säädettäessä polttoväli mahdollisimman pitkäksi, avauskulma pienenee ja kameroiden sijoittelu ja suuntaus on suunniteltava tarkoin, jotta samat vastinpisteet näkyvät mahdollisimman monella kuvalla ja keskinäisten havaintojen lukumäärä saadaan pidettyä mahdollisimman suurena. Myös kohteen muoto ja kameroiden laukaisin- ja tiedonkeruujärjestelmä asettivat rajoitukset kameroiden sijoittelulle. Kamerate piti kohteen muodon takia sijoittaa rakenteen reunoille, sillä kehikon keskellä ei ollut kiinnityspisteitä. Toisaalta kameroiden yhdistäminen USB 3 johdoilla kahteen tietokoneeseen rajoitti kauimmaisten kameroiden välimatkan noin kymmeneen metriin, jolloin kameroiden sijoittelu kuvauksen syvyysuunnassa oli erittäin rajattua.



Kuva 13: Mittauskalusto

Tässä työssä käytettiin kuutta Mightex SME-C050-U teollisuuskameraa, jotka oli yhdistetty USB 3 – datakaapeleilla kolmeen kannettavaan tietokoneeseen, joilla kamerat laukaistiin ja joihin kuvat tallennettiin. Teollisuuskameroiden tekniset tiedot käyvät ilmi taulukosta 1.

Taulukko 1: Mittakamera Mightex SME-C050-U:n tekniset tiedot

Parametrit	Mightex SME-C050-U (väri)	yksikkö
Resoluutio	2560 x 1920	px
CMOS kenno	Aptina Micron MT9P031, rolling shutter	
Pikselikoko	2,2 x 2,2	µm
Bittisyvyys	24(R/G/B)	bit
Valotusaika	0,05 - 750	ms
Triggeröinti	Manuaalinen (viive < 200µs)	
Triggeröintikaapeli	ACC-CAM-DIN8	
Linssin kiinnitys	C- tai CS	
Virrankäyttö	<2,0	W
Mitat	58x58x39	mm
Paino ilman linssiä	150	g

Referenssikamerana mittauksissa toimi Nikon D800E- järjestelmäkamera, jonka optiikan sai lukittua paikalleen, mikä edesauttoi sitä, että kalibroinnissa selvitetty sisäisen orientoinnin parametrit pysyivät muuttumattomina siirryttäessä suorittamaan mittakuvien ottamista. Osa referenssikameran teknisistä tiedoista käy ilmi taulukosta 2.

Taulukko 2: Referenssikamera Nikon D800E tekniset tiedot (Nikon 2015)

Parametrit	Nikon Digital SLR Camera D800E	yksikkö
Resoluutio	7360 x 4912	px
CMOS kenno	35,9mm x 24,0mm CMOS Nikon FX-format	
Pikselikoko	4,88 x 4,88	µm
Kuvausnopeudet	60@1280x720 - 30@1920x1080	fps
Valotusaika	0,125 - 30000	ms

Linssin kiinnitys	Nikon F	
Mitat	146x123x81,5	mm
Paino ilman linssiä	1000	g

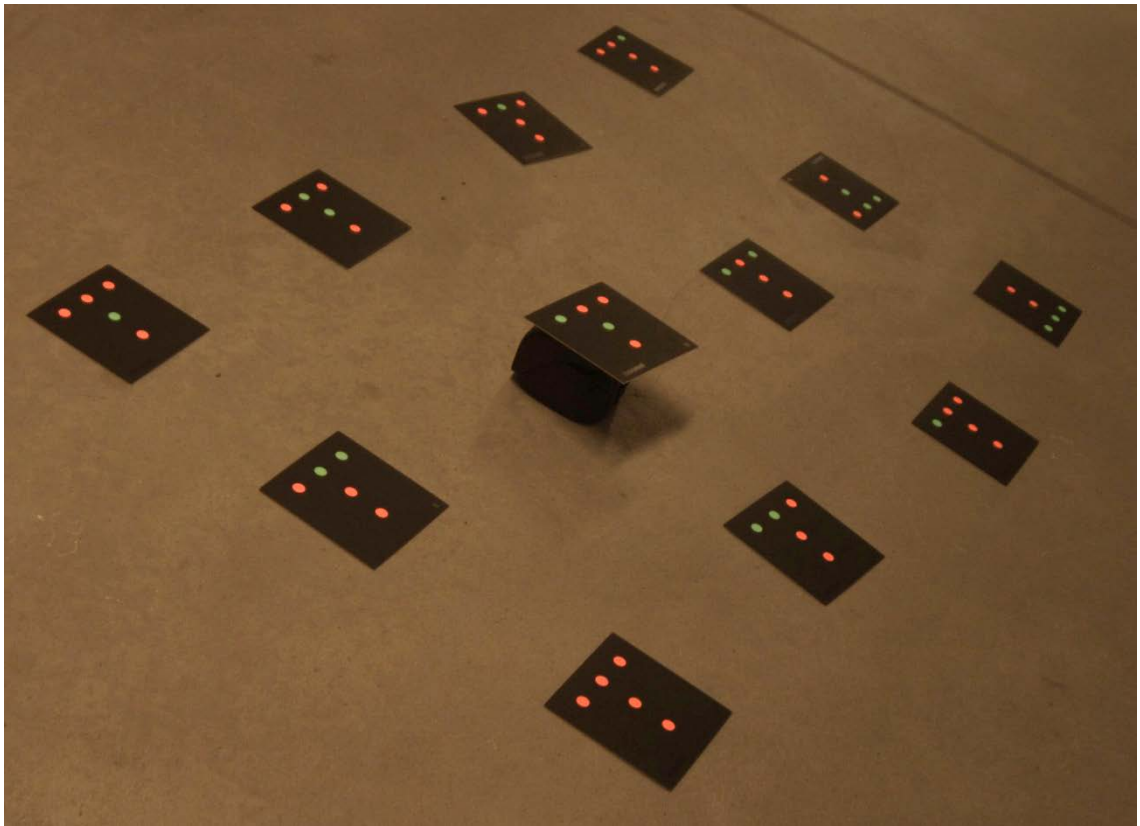
3.3 Koekuvaukset

Kuvattavan kohteen työympäristö oli haastava, joten koekuvaukset olivat kuvausten suunnittelun kannalta tärkeässä roolissa. Koekuvaukset suoritettiin Espoon Otaniemessä säästä riippumattomissa olosuhteissa parkkihallissa, jossa varsinaista kuvausta geometrisesti vastaavaan kuvaustilanteeseen oli mahdollista päästä. Kuvauspaikat sijoitettiin noin 25m päähän kaukaisimmista tähyksistä ja leveydeltään kauimmaisat kuvanottopaikat olivat noin 8m päässä toisistaan. Tämä vastasi geometrisesti todellisen kuvaustilanteen kuvausgeometriaa. Koekuvaukset pitivät sisällään mittauskaluston kalibroinnin mittausympäristössä ja itse koekuvien ottamisen minkä lisäksi erivärisiä ja kokoisia tähyksiä testattiin kuvausten yhteydessä. Kalibrointi oli lähestymistavaltaan lähellä *in-situ-kalibrointia*, mikä tarkoittaa mittauksen yhteydessä tapahtuvaa sisäisen orientoinnin parametrien selvittämistä, mutta koska kalibrointia varten otettiin erikseen kuvat, ei voida varsinaisesti puhua in-situ-kalibroinnista. Kuvausympäristössä suoritettavan kalibroinnin eduksi voidaan kuitenkin mainita samoja asioita kuin in-situ menetelmällekin: kalibrointi suoritetaan samoissa olosuhteissa kuin itse mittaus, jolloin voidaan varmistua säätöjen toimivuudesta vallitsevissa olosuhteissa sekä siitä, että kameran säädöt pysyvät muuttumattomina kalibroinnin ja mittauksen välillä. Koekuvauksissa kerättyä mittausdataa analysoitiin iWitness- ohjelmistolla, jolla myös kameroiden kalibrointi suoritettiin, jolloin kalibrointi- ja kuvausdatan yhteensopivuudesta voitiin varmistua.

Kuten todellisessakin mittaustilanteessa, myös koekuvauksen mittausprosessin aluksi kamerat kalibroititiin. Kuvaukset ja kalibrointi on suoritettava samoilla kameran säädöillä, joiden todettiin teollisuuskameroille olevan mahdollisimman pitkä polttoväli, jotta kohteen kaukaisimmatkin tähykset erottuivat mahdollisimman hyvin. Kamera on usein epästabiili mittalaite, jonka sisäinen orientointi voi muuttua, jos laitteistoa käytetään kalibroinnin ja mittauksen välissä tai jos kamera altistuu esimerkiksi värinälle. Kalibrointi mittausten yhteydessä edesauttaa sisäisen kameran orientoinnin pysymistä muuttumattomana, mikä puolestaan mahdollistaa tarkkojen mittakuvien ottamisen. Näissä

mittauksissa käytettävien teollisuuskameroiden optiikan sai lukittua niin, ettei se päässyt muuttumaan, minkä lisäksi kameran rakenne oli vankka verrattuna yleisesti amatöörikameroiden rakenteeseen.

Kalibroinnissa värikoodatuista tähyksistä muodostettiin kuvan 14 mukainen testikenttä, josta otettiin kuvia eri suunnista ja eri kameran kierroilla. Kuvassa näkyvät kalibrointitähykset olivat samanlaisia, kuin mitä Cronk ym. (2006) kuvailivat kameran kalibrointia käsittelevässä tutkimuksessaan. Kalibrointiprosessia on käyty läpi tarkemmin luvussa 2.4.



Kuva 14: Kalibroinnin testikenttä

Jotta kalibroinnin saa onnistumaan hyvin, tulee testikentän 12 tähystä sijoittaa siten, etteivät ne kaikki sijaitse samalla tasolla. Lisäksi kuvat tulee ottaa niin, että tähykset sijoittuvat mahdollisimman hyvin koko kuvatasolle. Tähyspisteiden osuminen myös kuvien reunoille on tärkeää, sillä kalibroinnissa selvitetään kameran sisäisen orientoinnin parametrien lisäksi myös radiaalinen piirtovirhe [2], joka on yleisesti suurempi kuvien reunoilla johtuen säteen suuremmasta taittumisesta optiikan reunoilla. iWitnessin

kalibroinnissa saadaan selvitettyä myös epäkeskisyyspiirtovirheen kaksi ensimmäistä parametria sekä affiinisuusparametrit.

3.4 Koekuvauksissa kerätyn datan analysointi

Koekuvauksien päämääränä oli selvittää todellista kuvaustilannetta varten mittauskaluston optimaaliset säädöt ja saavutettavissa oleva mittaustarkkuus, sekä selvittää käytettävälle tähyksille optimaalinen koko ja väri. Kameran säädöt oli mahdollista arvioida ilman erityistä ohjelmistoa, sillä kameran kuvanäkymän perusteella voitiin säätää valotus, avauskulma ja tarkennus niin, että koko kuvattavan kohteen tärkeimmät piirteet erottuivat hyvin mahdollisimman monelta kuvalta. Saavutettavissa olevan mittaustarkkuuden arviointiin puolestaan tarvittiin sekä referenssikameraa että ohjelmistoa, jolla mitattujen pisteiden tarkkuutta voitiin arvioida. Koekuvien mittaustulosten analysointiin ja kalibrointiin käytettiin iWitness- ohjelmistoa.

3.4.1 Referenssikameran kalibrointi ja koekuvaukset

Fotogrammetrisen menetelmän tarkkuuden selvittämiseksi koekuvaukset suoritettiin ympäristössä, joka vastasi todellista mittaustilannetta etäisyyksien ja kuvausgeometrian puolesta. Sääolosuhteiden takia koekuvaukset päätettiin järjestää sisätiloissa, minkä takia valaistus oli erilainen kuin mitä todellisessa mittaustilanteessa. Referenssikuvat otettiin Nikon D800E järjestelmäkameralla ja niiltä mitattua kolmiulotteista pisteistöä verrattiin Mightex-teollisuuskameralla otettujen kuvien pohjalta muodostettuun pisteistöön. Varsinaisessa mittauksessa käytettävien teollisuuskameroiden lukumäärää ei vielä koekuvausten aikana tiedetty varmasti, mutta vähintään neljää kameraa oli tarkoitus käyttää. Tarkkuusvaatimus mitattaville pisteille oli $\pm 4\text{mm}$, mikä oli lähtökohtaisesti haastava tilanne sekä kuvausgeometrian että -kaluston kannalta.

Koekuvaukset koostuivat järjestelmäkameran ja yhden teollisuuskameran kalibroinnista ja testikentän kuvauksesta. Vaikka tiedossa oli, että varsinaisessa mittaustilanteessa käytetään useampaa teollisuuskameraa, ei koekuvauksessa nähty tarpeelliseksi kalibroida ja käyttää neljää samanlaista kameraa. Kun yksi teollisuuskameroista oli kalibroitu, sillä voitiin ottaa kuvat neljästä eri kohdasta, jotka vastasivat kuvaustilanteen kameroiden

sijoittelua. Kameroiden kalibrointi ja otettujen kuvien tarkkuusanalyysi suoritettiin Photometrixin iWitness- ohjelmalla.

Järjestelmäkameralla otetut kalibrintikuvat oli helppo tunnistaa luvun 2.4 mukaisella iWitnessin autokalibrointi- toiminnolla, jolla selvitettiin kameran sisäiset parametrit. Otetuilta kuvilta erottuu selvästi sekä punaiset että vihreät tähykset, joten automaattinen kalibrintitoiminto pystyttiin suorittamaan ilman kuvanmuokkausta. Autocal-toiminnolla saatiin selville kalibroinnin arvioitu tarkkuus, kameran sisäisen orientoinnin parametrit ja kuvien yhteensovituksen arvioitu tarkkuus. Kalibroinnin arvioitu tarkkuus on erittäin tärkeä tieto, sillä se vaikuttaa suoraan kuvauksessa saavutettavissa olevaan tarkkuuteen. Kalibrintiprojektin yhteenveto löytyy taulukosta 3.

Taulukko 3: Nikon D800E kalibrintitiedot

iWitness Projektin Yhteenveto (17/07/2014)	
Projektin nimi:	d800kalibr.iwp
Kameran nimi:	NIKON D800E
Mittakaava asetettu:	ei
Kuvien lkm:	16
Mitattujen pisteiden lkm:	60
Kameroiden lkm:	1
Geometrian laatu:	1.0 (hyvä)
Pisteiden minimi lkm kuvalla:	53, DSC6311.jpg
Pienin pisteen leikkauskulma:	68 astetta pisteelle CC7_3
Pisteiden määrä kuvalla:	
Vain kahdella kuvalla:	0
Kolmella kuvalla:	60
Neljällä kuvalla:	60
Kuudella tai useammalla kuvalla:	60
3D pisteiden arvioitu tarkkuus (RMS 1- Sigma):	
X:	0.033 yksikköä, tai 1:45100

Y:	0.041 yksikköä, tai 1:35600			
Z:	0.036 yksikköä, tai 1:41500			
Kokonaisuudessaan:	0.037 yksikköä, tai 1:40300			
Arvioitu kuvien referenssitarkkuus:	0.32 pikseliä			
Itsekalibroinnin laatu:	1.0			
Kalibroinnin päivämäärä:	17.7.2014			
Resoluutio:	Leveys:	7360 px	pikselin lev:	0.0050mm
	Korkeus:	4912 px	pikselin kork:	0.0050mm
Kameravakio c:	14.606			
Pääpisteen poikkeama:	xp:	-0.063mm		
	yp:	0.016mm		
Radiaalinen piirtovirhe:	K1=	5.116e-005		
	K2=	2.789e-007		
	K3=	-3.318e-010		
Radiaalisen piirtovirheen korjausprofiili:				
r(mm)	dr(μm)			
0.0	+0.0			
2.0	+0.4			
4.0	+3.6			
6.0	+13.1			
8.0	+34.6			
10.0	+75.7			
12.0	+145.9			
14.0	+255.4			
16.0	+413.0			
18.0	+622.3			
20.0	+877.1			
22.0	+1154.6			

Kun kameran sisäinen orientointi oli selvitetty, voitiin suorittaa mittatarkka koekuvaus, jossa pisteiden 3D koordinaatit saatiin sidottua oikeaan mittakaavaan tarkasti mitatun mittakepin avulla. Kuva 15 on yksi koekuvauksessa otetuista kuvista.



Kuva 15: Koekuvaus Nikon D800E:lla

Nikon D800E iWitnessillä arvioitu tarkkuus mitattaville pisteille Otaniemessä järjestetyssä koekuvauksessa käy ilmi taulukosta 4.

Taulukko 4: Nikon D800E koekuvien tarkkuus

iWitness Projektin Yhteenveto (17/07/2014)	
Projektin nimi:	mittakuvat.iwp
Kameran nimi:	NIKON D800E
Mittakaava asetettu:	kyllä
Kuvien lkm:	22
Mitattujen pisteiden lkm:	43

Kameroiden lkm:	1
Geometrian laatu:	1.2 (hyvä)
Pisteiden minimi lkm kuvalla:	0, neljällä kuvalla
Pienin pisteen leikkauskulma:	37 astetta, pisteelle 40
Pisteiden määrä kuvalla:	
Vain kahdella kuvalla:	0
Kolmella kuvalla:	43
Neljällä kuvalla:	43
Kuudella tai useammalla kuvalla:	43
3D pisteiden arvioitu tarkkuus (RMS 1- Sigma):	
X:	0.305mm = 1:58600
Y:	0.685mm = 1:26100
Z:	0.209mm = 1:85800
Kokonaisuudessaan:	0.400mm = 1:44800
Arvioitu kuvien yhteensovitus tarkkuus:	0.27 px
Itsekalibroinnin laatu:	-
Kalibroinnin päivämäärä:	-
Resoluutio:	Leveys: 7360px pikselin leveys: 0.0050mm
	Korkeus: 4912px pikselin korkeus: 0.0050mm
Kameravakio c:	14.606mm
Pääpisteen poikkeama:	xp: -0.063mm
	yp: 0.016mm
Radiaalinen piirtovirhe:	K1= 5.295e-005
	K2= 2.674e-007
	K3= -3.101e-010
Radiaalisen piirtovirheen korjausprofiili:	
r (mm)	dr(μm)
0.0	+0.0

2.0	+0.4
4.0	+3.7
6.0	+13.4
8.0	+35.2
10.0	+76.6
12.0	+146.9
14.0	+256.4
16.0	+414.0
18.0	+624.2
20.0	+882.3
22.0	+1168.2

Järjestelmäkameralla otetut kuvat ylittivät halutun tarkkuuden mitattaville pisteille, sillä koekuvausten perusteella tähyksille saatiin keskimäärin 0,40mm virhe, kun vaadittu tarkkuus on 4mm. Järjestelmäkameralla otetut referenssikuvat mitattavasta kohteesta oli otettu paremmalla geometrialla ja lähempää kuin mitä todellisessa kuvaustilanteessa teollisuuskameroilla olisi mahdollista. Lisäksi kuvia oli useampi kuin kuusi, mikä tulisi olemaan teollisuuskameroilla otettujen kuvien maksimilukumäärä/laukaisu. Järjestelmäkameralla mittaustarkkuus oli siis lähes ideaalitalanteessa saavutettu, toisin kuin seuraavaksi tarkasteltava teollisuuskameran koekuvaus.

3.4.2 Teollisuuskameran kalibrointi ja koekuvaukset

Koekuvaus suoritettiin hieman hämärässä keinovalaistuksessa, mikä hankaloitti etenkin kameroiden kalibrointikuvien ottamista, sillä iWitness-ohjelma ei kyennyt tunnistamaan kalibrointitähyksiä automaattisesti ilman otettujen kuvien manipulointia. Säättämällä kuvien kirkkautta ja kontrastia saatiin kalibroinnissa onnistuneesti poistettua tunnistetut väärät pisteet ja lisättyä löydettyjen oikeiden pisteiden määrää. Paras tulos koko kuvan manipuloinnille tuntui olevan kirkkauden vähentäminen ja kontrastin nostaminen, mutta koska kuvan ehostuksenkaan jälkeen iWitness ei kyennyt tunnistamaan kaikkia vihreitä tähyksiä, piti jokainen vihreä piste korostaa erikseen uudella kuvamanipulaatiolla. Teol-

lisuuskameran kalibroinnista saadut parametrit käyvät ilmi taulukosta 5.

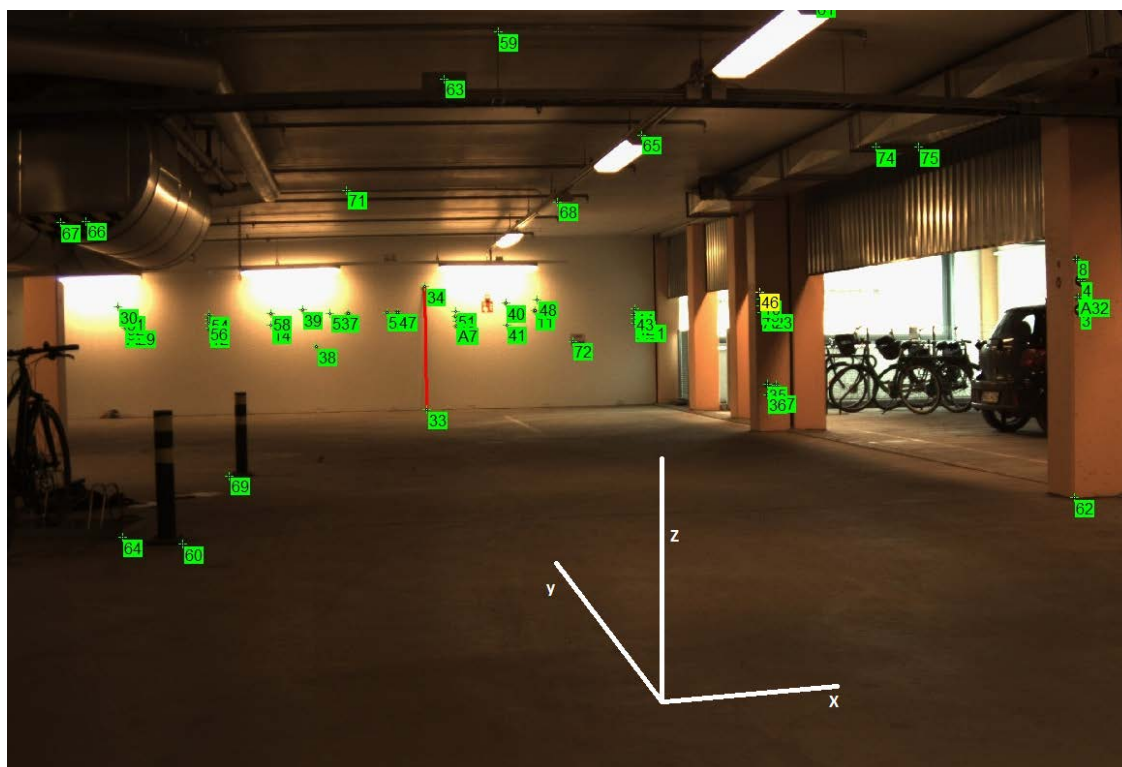
Taulukko 5: Mightex SME-C050-U kalibrintiyhteenvedo

iWitness-projektin Yhteenveto (17/07/2014)			
Projektin nimi:	Kalibraatio.iwp		
Kameran nimi:	Mightex SME-C050-U		
Mittakaava asetettu:	ei		
Kuvien lkm:	15		
Mitattujen pisteiden lkm:	60		
Kameroiden lkm:	1		
Geometrian laatu:	1.0(hyvä)		
Pisteiden minimi lkm kuvalla:	60 yhdellä kuvalla		
Pienin pisteen leikkauskulma:	87 astetta pisteelle CC4_3		
Pisteiden määrä kuvalla:			
Vain kahdella kuvalla:	0		
Kolmella kuvalla:	60		
Neljällä kuvalla:	60		
Kuudella tai useammalla kuvala:	60		
3D pisteiden arvioitu tarkkuus (RMS 1- Sigma):			
X:	0.062 yksikköä	=	1:17100
Y:	0.063 yksikköä	=	1:16700
Z:	0.051 yksikköä	=	1:20900
Kokonaisuudessaan:	0.059 yksikköä	=	1:18000
Arvioitu kuvien yhteensovitus	tarkkuus:	0.34px	
Itsekalibroinnin laatu:	1.1		
Kalibroinnin päivämäärä:	17.7.2014		
Resoluutio:	Leveys:	2560p	0.005m
		x	pikselin leveys: m

	Korkeus:	1920p x	pikselin kor- keus:	0.005m m
Kameravakio c:	17.311mm			
Pääpisteen poikkeama:	xp:	0.590mm		
	yp:	-0.662mm		
Radiaalinen piirtovirhe:	K1=	1.154e-003		
	K2=	3.187e-006		
	K3=	-3.791e-008		
Radiaalisen piirtovirheen korjausprofiili:				
r (mm)	dr(μm)			
0.0	+0.0			
1.0	+1.2			
2.0	+9.3			
3.0	+31.8			
4.0	+76.5			
5.0	+151.2			
6.0	+263.3			
7.0	+418.0			
8.0	+615.6			

Kalibroinnista saatu tärkein tieto oli sisäisen orientoinnin parametrit, joita ilman koekuvauksissa otetuista kuvista ei olisi saatu mitattua tarkasti. Tämän lisäksi koekuvauksissa yksittäisille pisteille saatujen koordinaattien tarkkuus oli kiinnostava tieto, sillä se antoi suuntaa saavutettavissa olevasta tarkkuudesta varsinaisessa kuvaustilanteessa. Referenssikameran mittausten perusteella sekä käyttämällä kalibroinnista saatuja arvoja koekuvauksessa teollisuuskameroilla otettujen kuvien tarkkuutta voitiin arvioida. Kuva 16 on yksi neljästä teollisuuskameralla otetusta koekuvasta, jossa näkyy takaseinällä mitta-keppi, jolla pisteistö saatiin skaalattua oikein. Kuvassa on nähtävissä myös koordinaattisto, jonka mukaan x-akseli osoittaa suunnilleen kohteen leveys-, y-akseli syvyys- ja z-akseli korkeussuuntaan. Koordinaatiston pääsuunnat pysyvät suunnilleen samoina kai-

kissa tämän työn mittauksissa. Taulukosta 6 selviää suuntaa antava tarkkuus, joka voitiin neljällä kalibroidulla teollisuuskameralla saavuttaa varsinaisessa mittauksessa.



Kuva 16: Mightex SME-C050-U koekuvaus

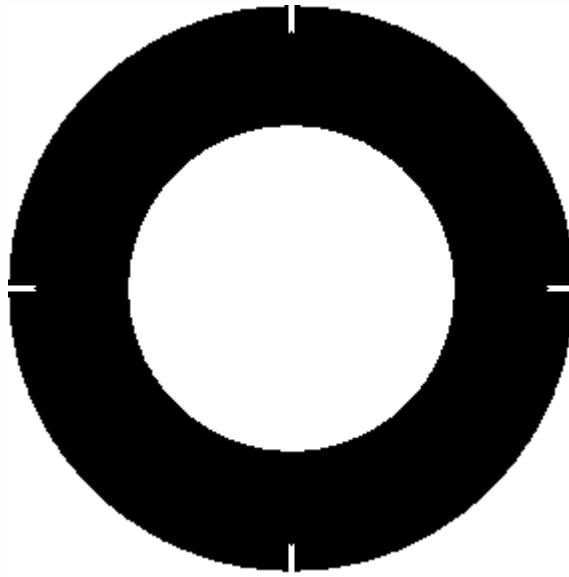
Taulukko 6: Teollisuuskameran koekuvauksen yhteenveto

iWitness Projektin Yhteenveto (17/07/2014)	
Projektin nimi:	Koekuvaus.iwp
Kameran nimi:	Mightex SME-C050-U
Mittakaava asetettu:	on
Kuvien lkm:	4
Mitattujen pisteiden lkm:	58
Kameroiden lkm:	1
Geometrian laatu:	1.0(hyvä)
Pisteiden minimi lkm kuvalla:	58, kaikilla kuvilla
Pienin pisteen leikkauskulma:	12 astetta pisteelle 30
Pisteiden määrä kuvalla:	

Vain kahdella kuvalla:	0		
Kolmella kuvalla:	58		
Neljällä kuvalla:	58		
3D pisteiden arvioitu tarkkuus (RMS 1- Sigma):			
X:	4.260mm	=	1:4400
Y:	11.518mm	=	1:1600
Z:	1.951mm	=	1:9800
Kokonaisuudessaan:	5.910mm	=	1:3200
Arvioitu kuvien yhteensovitus-tarkkuus:	0.26px		
Itsekalibroinnin laatu:	-		
Kalibroinnin päivämäärä:	17.7.2014		
Resoluutio:	Leveys:	2560px	pikselin leveys: 0.005mm
	Korkeus:	1920px	pikselin korkeus: 0.005mm
Kameravakio c:	17.311mm		
Pääpisteen poikkeama:	xp:	0.590mm	
	yp:	-0.662mm	
Radiaalinen piirtovirhe:	K1=	1.154e-003	
	K2=	3.187e-006	
	K3=	-3.791e-008	
Radiaalisen piirtovirheen korjausprofiili:			
r (mm)	dr(μm)		
0.0	+0.0		
1.0	+1.2		
2.0	+9.3		
3.0	+31.8		
4.0	+76.5		
5.0	+151.2		
6.0	+263.3		
7.0	+418.0		
8.0	+615.6		

Taulukosta 6 käy ilmi arvioitu tarkkuus, joka oli kuvaustilanteen valaistuksen ja kuvausgeometrian huomioon ottaen sängen hyvä. Kokonaisuudessaan saavutettu alle kuuden millimetrin virhe oli lähellä neljän millimetrin tarkkuusvaatimusta. On kuitenkin huomioitava, että kokonaistarkkuutta heikentää kuvausgeometriasta johtuva huono tarkkuus syvyysuunnassa (11,518mm), joka ei ole muodonmuutoksen kannalta yhtä relevantti kuin pysty- ja sivusuunnan mittaustarkkuus. Lisäksi voidaan todeta, että lähempänä sijaitsevan yksittäisen pisteen mittaustarkkuus on yleisesti parempi, kuin mittaustarkkuus kokonaisuudessaan. Esimerkiksi pisteelle 46 (kuva 16), joka sijaitsi yli puolen välin pisimmästä mitattavasta matkasta, arvioitu virhe oli vain $\pm 0,09$ mm.

Tarkkuustarkastelun lisäksi koekuvauksissa tutkittiin erilaisten tähysten toimivuutta kuvaustilanteessa. Käytössä oli halkaisijaltaan 4,5cm ja 7,5cm ympyrätähyksiä, joita oli sekä mustavalkoisina, että punamustina. Punamustaa yhdistelmää päätettiin testata kameran kalibrointia käsittelevän luvun 2.4 tulosten perusteella, joissa todettiin punaisen erottuvan automatisoidussa kalibrointiprosessissa hyvin. Eri kokoja päätettiin testata, sillä kuvauksessa välimatkat ovat pitkiä ja tähysten erottuvuus on mittauksen kannalta olennaisen tärkeää, mutta toisaalta liian ison tähyksen keskikohtaa ei saada välttämättä mitattua yhtä tarkasti kuin pienen tähyksen, kun mittausetäisyys on lyhyt (alle 10m). Koekuvausten perusteella punamusta väriyhdistelmä päätettiin hylätä, sillä etenkin heikommassa valaistuksessa tähyksen tunnistaminen iWitnessillä vaati kuvien kirkkauden ja kontrastin säätämistä. Myös pienemmät, halkaisijaltaan 4,5cm tähykset jätettiin pois varsinaisesta mittauksesta, sillä vaikka ne erottuvatkin vielä kymmenen metrin päässä hyvin, kauempana niitä ei enää erottanut kuvauksessa käytössä olevilla teollisuuskameroilla. Kuvassa 17 on tähysmalli, jota varsinaisessa mittauksessa päädyttiin käyttämään.



Kuva 17: Kuvauksessa käytettävä tähys

3.5 Deformoituvan metallikappaleen mittaus

Kohteeseen tutustumisella ja Otaniemessä suoritetuilla koekuvauksilla saavutettiin tärkeää tietoa, joka toimi pohjatietona varsinaisessa mittauksessa. Kohteessa käynti ennen mittauksia antoi hyvän kuvan mittausolosuhteista ja työympäristön haasteista ja koekuvaukset puolestaan valottivat mittausteknisiä puolia, kuten saavutettavissa olevaa tarkkuutta ja kameran optimaalisia säätöjä. Yksi mittauksen kannalta olennainen elementti, johon ei voida vaikuttaa, on sää ja mittauspäivän valinta asetti haasteensa, sillä se oli suunniteltu alkusyksyyn, jolloin sateen uhka on suuri ja sateella mittaaminen on laitteistosta, työympäristöstä ja mittausmenetelmästä johtuen mahdotonta.

Mittauspäivä saatiin järjestettyä 3.9.2014, jolloin mittausolosuhteet olivat lähes ideaalit, lukuun ottamatta auringonpaistetta, joka voi aiheuttaa heijastuksia ja yli valottumista kuvilla, jotka eivät kuitenkaan vaikuttaneet tähän mittaukseen kovin paljoa.

3.5.1 Laitteiston kalibrointi

Laitteiston kalibrointi varsinaisia mittauksia varten suoritettiin hieman eri tavalla kuin koekuvauksissa. Koekuvauksissa kalibrointi suoritettiin kuvausten yhteydessä, mutta koska varsinaisen mittauksen tiedettiin kestävän pitkään, päätettiin kalibrointi suorittaa

etukäteen sisätiloissa sellaisilla kameran säädöillä, jotka toimisivat mahdollisimman hyvin mittaustilanteessa. Arviot kalibroinnissa käytettäville kameran säädöille saatiin koekuvauksista ja kuten koekuvaustenkin yhteydessä, myös todellisen kohteen kuvaamisessa käytettiin referenssikamerana Nikon D800E järjestelmäkameraa, ja varsinaisina mittakameroina Mightex SME-C050-U teollisuuskameroita.

Erona koekuvausten kalibrointiin oli paitsi kalibroinnin ja kuvaustilanteen erottaminen toisistaan, myös teollisuuskameroiden lukumäärän nostaminen yhdestä kuuteen. Koekuvauksissa menetelmää vain testattiin, joten tarpeen oli käyttää vain yhtä kameraa, jonka kuvanottoaikkaa voitiin vaihtaa, sillä kuvanottohetkien välillä sai olla pientä eroa, toisin kuin varsinaisessa mittauksessa. Todellinen kuvaus oli suunniteltu tehtäväksi kuudella kameralla, joten niistä jokainen tuli kalibroida. Kameroiden lisääminen myös muutti hieman tarvittavaa koko systeemin kalibrointia, sillä nyt kaikki kamerat piti saada laukaisemaan samaan aikaan, jotta kuormituksen aikana tapahtuvat kohteen taipumat saataisiin mitattua.

Tilanteessa, jossa kalibrointi ja mittaaminen suoritetaan erikseen, on syytä kiinnittää huomiota kameroiden säilytykseen ja mahdolliseen kuljetukseen, sillä mikäli kameroiden sisäisen orientoinnin parametrit pääsevät muuttumaan esimerkiksi linssijärjestelmän liikkumisen johdosta, ovat mittakuvista saadut arvot triviaaleja. Mittausprosessiin voidaan tämän takia sisällyttää jälkikalibrointi, jolla tarkistetaan kameroiden sisäisen orientoinnin parametrit mittausten jälkeen. Tässä työssä käytössä olleiden teollisuuskameroiden linssijärjestelmän sai lukittua paikoilleen, joten voitiin olettaa, että kameroiden kalibroinnit pysyivät muuttumattomina kalibroinnin ja mittausten välillä, eikä jälkikalibrointia koettu tarpeelliseksi.

3.5.2 Mittauksen valmistelu

Mittausprosessi oli tullut jo koekuvausten kautta tutuksi ennen varsinaista mittausta, mutta vaikka mitattavaan kohteeseen olikin käyty tutustumassa ennen mittausten suorittamista, oli kuvauksen järjestely silti vaativa tehtävä ja onnistuneen mittauksen kannalta huomioitavia seikkoja oli paljon. Verrattaessa koekuvauksia varsinaisiin mittauksiin, oli suurin ero siinä, että varsinaista kohdetta mitattaessa on työskenneltävä korkealla tuulisissa olosuhteissa, minkä lisäksi varsinaisessa mittauksessa oli käytössä enemmän mit-

tausinstrumentteja, joiden kuljettaminen mittauspaihalle ja asemointi mittausta varten vaati enemmän työtä, kuin koekuvaustilanteessa. Mitattavan rakenteen muodon vuoksi kuvauskaluston asetteleminen oli rajoitetumpaa kuin koekuvauksissa, minkä lisäksi näköesteiltä ei voitu välttyä, sillä esimerkiksi mitattavan kappaleen kaapelit ja vaijerit tulivat kuvanäkymään peittämään tähyksiä. Kuvauksessa apuna käytettävien tähysten koko, väri ja muoto olivat koekuvauksissa validoitu, mutta tähysten kiinnittäminen kohteeseen oli haastavaa, eikä mittauksen kannalta tärkeimpään kohtaan, eli kuvauksen syvyys suunnassa pitkittäin näkyviin palkkeihin a ja b (kuva 12) saatu keskikohtaan kiinnitettyä tähyksiä, vaan havainnot siitä kohdasta oli tehtävä käyttäen apuna luonnollisesti erottuvia kohteita, tässä tapauksessa pultin kantoja. Luonnollisia kohteita käytettäessä epävarmuus oikeasta kohdasta on suurempi kuin tähyksiä käytettäessä, ja yleensä kuvien yhdistämistarkkuus huononee sen myötä. Toisaalta ilman näiden kohteiden käyttämistä havaintoja voi olla liian vähän tai liian rajoitetulta kuva-alueelta, jolloin kuvausgeometria huononee ja sen mukana myös mitattujen pisteiden epätarkkuus kasvaa. Kuvattavaan kohteeseen saatiin kiinnitettyä yhteensä noin 50 tähystä, minkä lisäksi havaintoina käytettiin muun muassa pulttien kantoja.

Mittaukseen käytettävät teollisuuskamerat kiinnitettiin puristimilla metallirunkoon, jotta mitään muutoksia mitattavaan rakenteeseen ei tarvinnut tehdä. Kameran sijoitettiin mahdollisimman leveälle alalle, jotta kuvakanta saatiin mahdollisimman suureksi. Kameran pyrittiin myös asemoimaan niin, että ne olivat hieman eri korkeudella toisiinsa nähden sekä eri syvyyksillä kuvaussuuntaan nähden. Kuvien tallentamiseen ja laukaamiseen käytettävät tietokoneet rajoittivat kameroiden sijoittelua syvyys suunnassa, joten ideaalista kuvausgeometriasta ei voida puhua.

3.5.3 Mittauksen referenssidata

Kuten koekuvauksissa, myös todellista kohdetta mitattaessa referenssikamerana käytettiin Nikon D800E järjestelmäkameraa. Referenssikameralla kuvanotto paikka ei ollut yhtä rajoitettu, kuin teollisuuskameroita käytettäessä, joten referenssikuville kuvausgeometria ja mitatun pisteistön tarkkuus olivat hyvätasoisia. Kalibroinnissa Nikon D800E:lle saavutettiin keskimäärin 1:47000 tarkkuus, joka on samaa luokkaa kuin koekuvauksia varten suoritettu kalibrointi, jonka tuloksena saatiin arvioituksi tarkkuudeksi

1:40300. Kohteesta otettujen referenssikuvien perusteella keskimääräiseksi arvioiduksi tarkkuudeksi saatiin 0,008m. Muut referenssikameran mittaustiedot käyvät ilmi taulukosta 7.

Taulukko 7: Referenssikameran yhteenveto

iWitness Projektin Yhteenveto (22/02/2015)				
Projektin nimi:	D800E_referenssi.iwp			
Kameran nimi:	NIKON D800E			
Mittakaava asetettu:	kyllä			
Kuvien lkm:	10			
Mitattujen pisteiden lkm:	65			
Kameroiden lkm:	1			
Geometrian laatu:	1.2 (hyvä)			
Pisteiden minimi lkm kuvalla:	38			
Pienin pisteen leikkauskulma:	3 astetta pisteelle 10			
Pisteiden määrä kuvalla:				
Vain kahdella kuvalla:	13			
Kolmella kuvalla:	53			
Neljällä kuvalla:	53			
Kuudella tai useammalla kuvalla:	48			
3D pisteiden arvioitu tarkkuus (RMS 1- Sigma):				
X:	0,005m	=	1:3500	
Y:	0,017m	=	1:1000	
Z:	0,003m	=	1:6000	
Kokonaisuudessaan:	0,008m	=	1:2100	
Arvioitu kuvien yhteensovitustarkkuus:			0,10px	
Resoluutio:	Leveys:	3680px	pikselin leveys:	0.0049mm
	Korkeus:	2456px	pikselin korkeus:	0.0049mm
Kameravakio c:	7,097mm			
Pääpisteen poikkeama:	xp:	-0,029mm		
	yp:	0,012mm		

Radiaalinen piirtovirhe:	K1=	1,615e-004
	K2=	1,443e-006
	K3=	-8.171e-010
Radiaalisen piirtovirheen korjausprofiili:		
r (mm)	dr(μm)	
0.0	+0.0	
1.0	+0.2	
2.0	+1.3	
3.0	+4.7	
4.0	+11.7	
5.0	+24.1	
6.0	+43.8	
7.0	+72.9	
8.0	+112.8	
9.0	+163.9	
10.0	+224.1	

Referenssikuvauksessa saavutettua tarkkuutta voidaan pitää hyvänä ottaen huomioon haastavan kuvausympäristön ja kohteen suuren koon. Tarkkuutta olisi mahdollista saada parannettua ottamalla kuvat täydellä resoluutiolla, joka on 7360×4910 pikseliä. Nyt kuvat otettiin resoluutiolla 3680×2456 pikseliä.

3.5.4 Mittakuvat

Mittakuvat otettiin koekuvauksessakin käytetyillä Mightex SME-C050 teollisuuskameroilla. Koekuvauksissa käytettiin vain yhtä kameraa neljällä kuvanotto paikalla, sillä menetelmän validoimiseksi useamman kamerasysteemin ei tarvinnut käyttää. Todellisessa mittaustilanteessa kameroita oli kuitenkin käytössä kuusi kappaletta, jotka kiinnitettiin mitattavaan rakenteeseen ja kytkettiin kahteen tietokoneeseen, jotka tallensivat kuvat USB3 porttien kautta. Lisäksi kameroiden laukaisemiseen käytettiin yhtä tietokonetta, jolla kamerat asetettiin laukomaan yhtä pitkiä kuvasarjoja samanaikaisesti. Ennen

kuormitusta otettiin kuvat, jotka kuvasivat rakenteen lepotilaa ja johon kuormituksen aikana otettuja kuvia verrattiin.

2	1	a		
3		k		c
d				
4				
5	6	b		

Kuva 18: Mitattava runko yläperspektiivistä

Kuva 18 havainnollistaa mitattavaa kohdetta. Kuvassa $a = b \approx 25m$ ja $c = d \approx 6,5m$. Kappale oli tuettu kulmista ja sitä kuormitettiin kuvassa 18 näkyvän suorakulmio k:n kohdalta. k on mobiili kelkka, johon kiinnitettiin raskas punnus, jolla kappaleen kuormitus tapahtui. Kameroiden paikat on merkitty kuvaan numeroilla 1-6 ja ne oli suunnattu päätypalkki c:tä kohti. Kuvien tallennukseen käytetyt tietokoneet sijoitettiin d:n molempiin pätyihin. Tähykset, jotka toimivat apuna kuvien pistepilvien rekisteröinnissä oli kiinnitetty palkkiin c, sekä kelkkaan k ja niitä oli yhteensä noin 50. Kaikkia tähyksiä ei saatu näkymään kaikilla kuvilla joten lisäpisteitä haettiin rakenteen pultinkannoista ja selvästi erottuvista kulmista. Tilanteen kuvausgeometriasta johtuen palkkiin a tai b ei ollut mielekäästä kiinnittää tähyksiä, sillä ne olisivat olleet liian viistossa erottuakseen kuvilta, mutta toisaalta juuri näiden palkkien keskikohdan taipuma oli muodonmuutoksen kannalta tärkein, joten kaksi lisäpistettä valittiin palkin a keskikohdan läheltä. Ongelmana näiden pisteiden kanssa oli se, etteivät ne näkyneet kaikilla kuvilla, eikä niiden tarkkuus ollut näin ollen paras saavutettavissa oleva.

Kuvaaminen suoritettiin niin, että kamerat asetettiin ottamaan kuvia puoleksi minuutiksi, jonka aikana kappaletta alettiin kuormittamaan. Kappaletta kuormitettiin yhteensä viisi kertaa ja useammalla toistolla pyrittiin varmistamaan vähintään yhden onnistuneen kuvasarjan tallennus. Kuormituksen aikana tapahtuvan huojunnan takia eri kameroiden ottamien kuvien tuli olla täysin samalta ajanhetkeltä, jotta mitattu pistepilvi ei päässyt vääristymään. Huojunnan takia laserkeilaimen käyttäminen tämän tilanteen mukaiseen

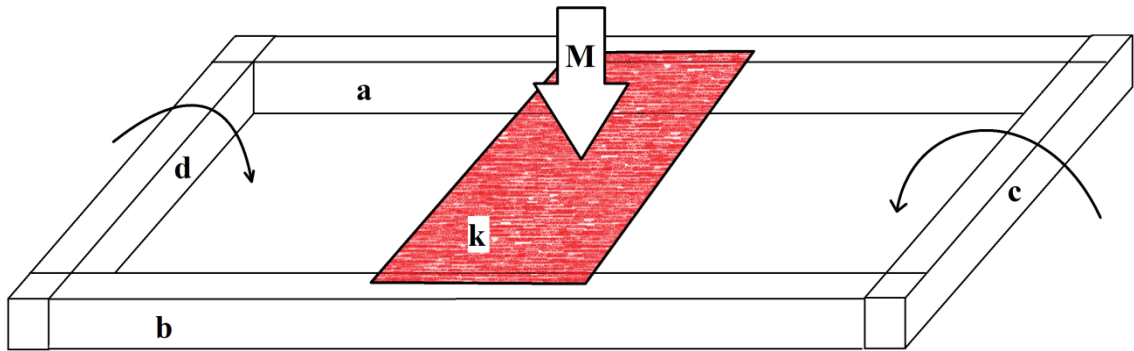
muodonmuutosmittaukseen ei onnistu luotettavasti. Kuvassa 19 on asetettu päällekkäin kameran 4 ottamat kaksi kuvaa, joista ensimmäinen on lepo- ja toinen kuormitustilasta otettu.



Kuva 19: Rakenteen muodonmuutos

Kuvaa on muokattu toisen kuvan häivytyksellä, molempien kuvien terävöittämisellä sekä kuvan rajauksella, mutta ne ovat kuitenkin asetettu suoraan päällekkäin. Kuvassa 18 kuvattu kelkka k näkyy kuvassa 19 etualalla ja taustalla näkyy palkki c. Kuvan 19 perusteella näyttäisi siltä, että kuormituksen seurauksena palkki c on päässyt liikkumaan alaspäin ja kelkka k on pysynyt paikallaan, mutta todellisuudessa raskaasti kuormitettu kelkka on joutanut alaspäin, palkit a ja b ovat taipuneet keskeltä, minkä lisäksi palkit c ja d ovat kiertyneet ja niiden mukana myös kamerat. Kameroiden kiertäminen on aiheuttanut sen, että asetettaessa kuvat päällekkäin, kelkassa k näkyvät tähykset näyttäisi-

vät olevan kohdakkain, minkä takia se näyttää pysyneen paikallaan ja palkki c näyttää liikkuneen. Palkkien c ja d kiertyminen ei ole kovin merkittävä, mutta johtuen niiden pitkästä välimatkasta on muutos selvästi nähtävissä, kun verrataan tähysten sijaintia kuvassa 19 lepo- ja kuormitustilan välillä. Kuvassa 20 kuormituksen aiheuttamaa muodonmuutosta on havainnollistettu..



Kuva 20: Kuormituksen aiheuttama deformaatio

Jos kuvilta halutaan saada palkkien a tai b taipuma näkyviin, voidaan palkin c tähykset asettaa kohdakkain lepo- ja kuormitustilasta otettujen kuvien välillä. Tällä operaatiolla saadaan havainnollistettua tapahtunutta muutosta, mutta mittaamista varten mittakuvilta oli suoritettava pisteiden rekisteröinti sekä lepo- että kuormitustilasta, minkä jälkeen näitä pisteistöjä voitiin verrata keskenään. Kuvassa 21 on tehty kuvien kohdistus, jonka avulla palkin a taipuma voidaan todeta.



Kuva 21: Palkin taipuma kuormitettaessa

Kuvassa erottuva varjo etualalla olevan palkin yläpuolella on se muutos, mitä voidaan todeta tapahtuvan rakennetta kuormitettaessa. Vaikka deformaatio oli selvästi havaittavissa, rakenteen huojunnasta johtuen oli tarkkaa mittausta varten valittava kuvat niin, että eri kameroilla otetut kuormitustilan kuvat olivat tarkalleen samalta ajanhetkeltä. Kameratekniikka oli mittausta varten asetettu ottamaan kuvia samanaikaisesti, mutta teknisen vian vuoksi kaksi kuudesta kamerasta ei saanut useasta kuvasarjasta huolimatta tallennettua yhtään kuvaa kuormitustilasta, joten mittauksiin oli käytettävissä vain neljä kameraa, mikä heikensi alun perinkin huonoa kuvausgeometriaa. Toisaalta koekuvausten tulosten perusteella voitiin todeta mittauksen olevan mahdollinen myös neljää kameraa käyttäen, sillä koekuvaus suoritettiin neljällä kuvanottoaikalla.

4 Tulokset

Mittauksen haasteista huolimatta kohteesta saatiin mitattua teollisuuskameroilla otetuilta kuvilta tarkka pisteistö, jota voitiin verrata sekä järjestelmäkameralla muodostettuun pisteistöön että rakenteesta olemassa olevaan CAD-malliin. iWitnessiä käytettiin pisteilvien muodostamiseen ja pisteistöjen tarkkuuden arviointiin sekä lepo että kuormitus-tilassa. Pisteistöt asetettiin paikallaan pysyneiden tähytsten osalta kohdakkain CloudCompare-ohjelmalla, jolla myös pisteiden välimatka eli kuormituksen aiheuttama muodonmuutos pystyttiin mittaamaan.

Alkutilasta otettujen mittakuvien arvioitu tarkkuus ilmenee taulukosta 8.

Taulukko 8: Mightex teollisuuskameroiden arvioitu tarkkuus mitatulle kohteelle lepotilassa

iWitness Project Summary (16/02/2015 11:59am)
Camera names: SME-002, SME-020, SME-001, SME-025
Number of images: 4
Number of referenced points: 49
Number of cameras: 4
Quality of geometry: 1.8 (kohtalainen)
Minimum number of points on an image: 40 on image: cam4.jpg
Minimum point intersection angle: 9 degs for point: 23
Number of points referenced on:
2 images only: 2
3 or more images: 47
4 or more images: 33
Estimated accuracy of 3D point coordinates (RMS 1-Sigma):
X: 0.006 m, or 1:2500
Y: 0.006 m, or 1:2600
Z: 0.002 m, or 1:9500
Overall: 0.004 m, or 1:3400
Estimated accuracy of image referencing: 0.16 pixels

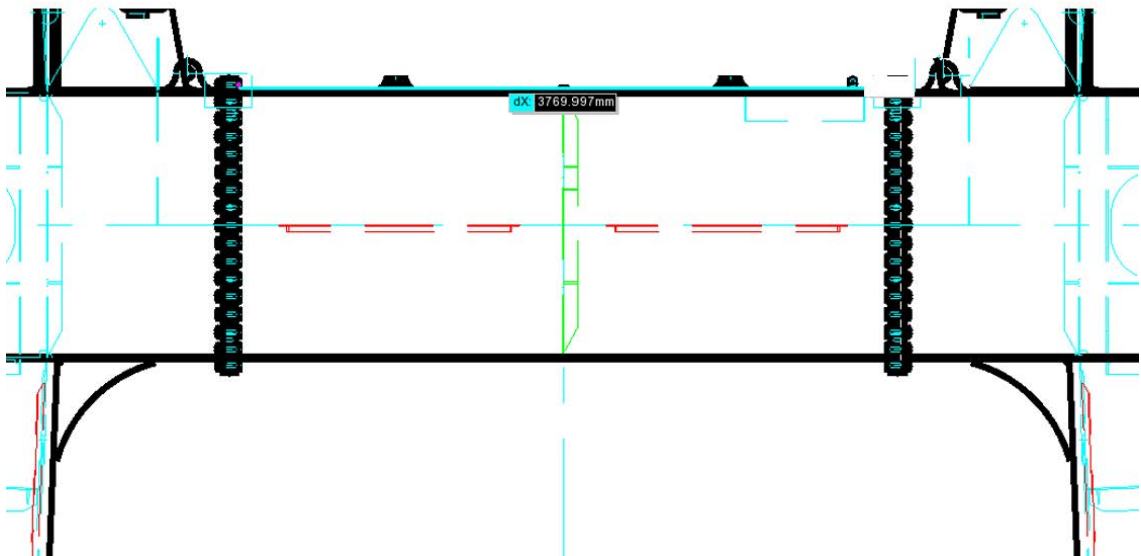
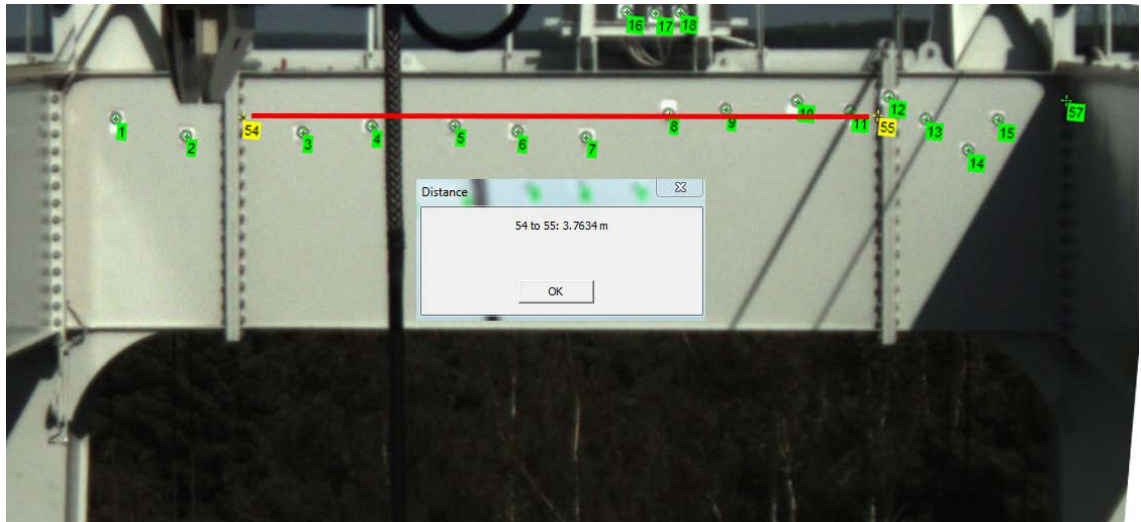
Taulukon perusteella voi todeta huonon kuvausgeometrian, joka osaltaan johtuu kahden kameran jäämisestä pois mittauksista ja huonontaa saavutettavissa olevaa tarkkuutta.

Mittauksissa ilmenneistä haasteista huolimatta voidaan huomata, että pisteille arvioitu keskimääräinen tarkkuus on 4mm ja muodonmuutoksen kannalta tärkeimmässä z-akselin suunnassa keskimäärin 2mm. Kuormitustilasta saatiin hyvin samankaltaiset tulokset, jotka on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 9: Mightex teollisuuskameroiden arvioitu tarkkuus mitatulle kohteelle kuormitustilassa

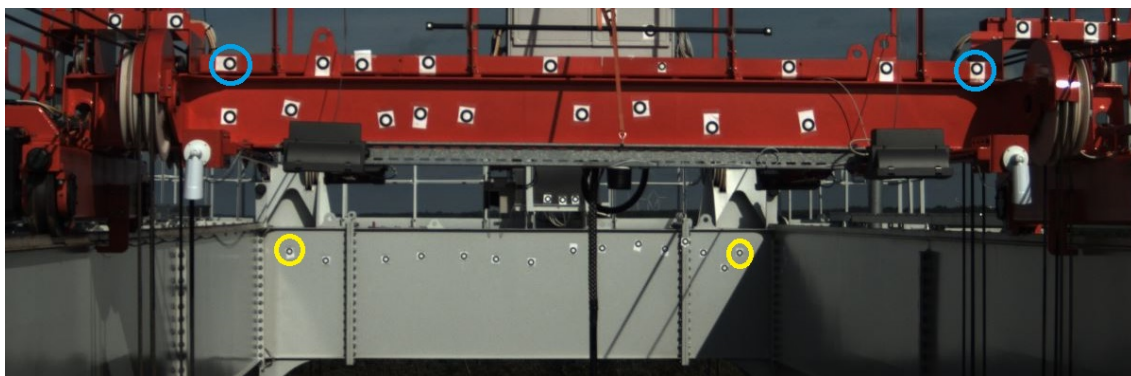
iWitness Project Summary (05/12/2014 11:58am)
Project Name: kuorma.iwp
Camera names: SME-002, SME-020, SME-001, SME-025
Number of images: 4
Number of referenced points: 49
Number of cameras: 4
Quality of geometry: 1.8 (kohtalainen)
Minimum number of points on an image: 40 on image: cam4_kb.jpg
Minimum point intersection angle: 9 degs for point: 23
Number of points referenced on:
2 images only: 2
3 or more images: 47
4 or more images: 32
6 or more images: 0
Estimated accuracy of 3D point coordinates (RMS 1-Sigma):
X: 0.007 m, or 1:2000
Y: 0.007 m, or 1:2100
Z: 0.002 m, or 1:7600
Overall: 0.005 m, or 1:2700
Estimated accuracy of image referencing: 0.20 pixels

Mittauksen onnistumista pystyi varmentamaan vertaamalla käytettävissä olleen CAD-mallin piirteiden etäisyyksiä lepotilassa mitattuihin etäisyyksiin. Vertailu on havainnollistettu kuvassa 23.



Kuva 22: Fotogrammetrisen mittauksen vertailu CAD-malliin

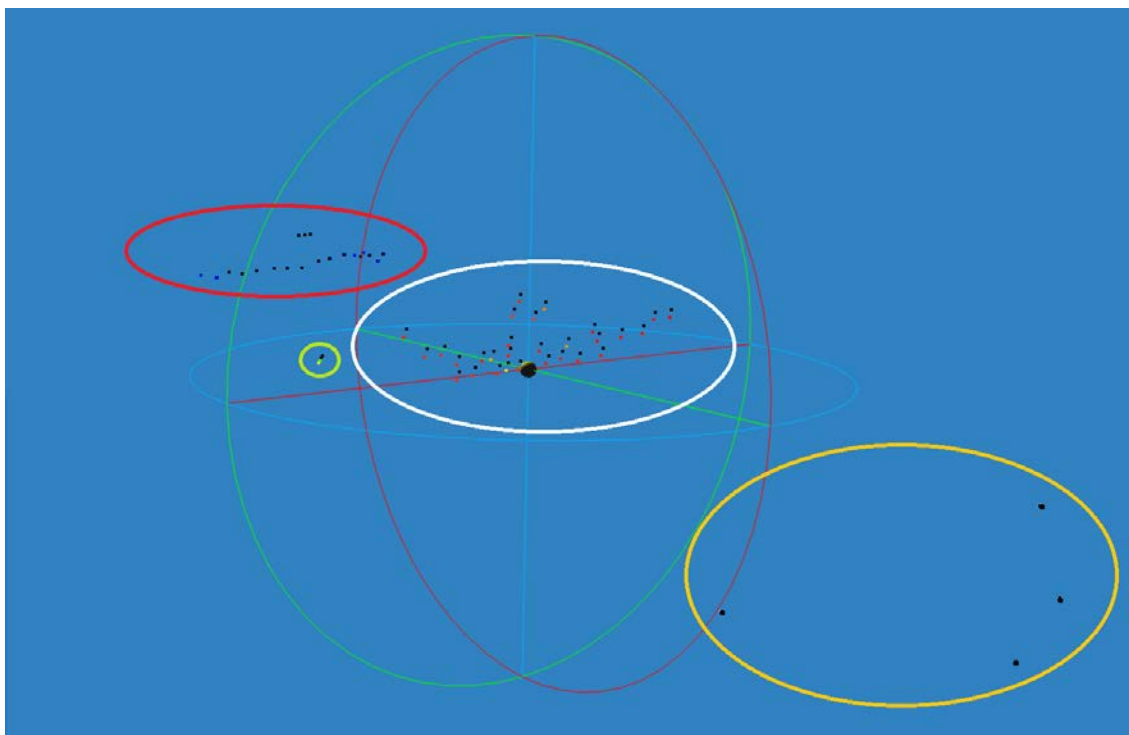
Kun päätypalkissa näkyvien pulttien etäisyyksiä verrattiin mitattujen pisteiden (54, 55) ja CAD-mallin välillä, saatiin erotukseksi 6,5mm. Erotus on suuruusluokaltaan hieman toivottua huonompi, mutta selitettävissä pultinkantojen huonolla erottuvuudella kuvista. Mikäli pultinkannat olisi näkyvöitetty tähyksillä, olisi tarkkuus voinut olla parempi. Syvyys suunnassa suoritettu etäisyyksien vertailu tuotti senttimetrin tason eroja, mikä selittyy huonolla kuvausgeometrialalla. Myös referenssikameralla mitattujen pisteiden etäisyyksiä verrattiin mittakuvilta mitattuihin etäisyyksiin. Vertailuun otettiin mukaan päätypalkin c kauimmaisten tähyksien välinen etäisyys sekä lähempänä kulkassa olevien tähyksien välinen etäisyys. Kuvaan 23 on merkitty vertailuun valitut tähykset.



Kuva 23: Pisteiden vertailuun valitut tähykset.

Referenssikameralla mitattu takapalkin pisteiden välinen etäisyys on 4,895482m ja teollisuuskameroilla mitattu etäisyys puolestaan 4,879127m ja etäisyyksien ero 16,355mm. Lähempää kulkasta k valittujen tähysten välinen etäisyys on referenssikameralla mitattuna 4,360665m ja teollisuuskameroilla mitattuna 4,357941m ja ero etäisyyksien välillä 2,724mm.

Muodonmuutostulkintaa varten käytettiin CloudCompare ohjelmaa, jolla lepo- ja kuorimitustilan pisteet saatiin kohdistettua, minkä jälkeen eri tilanteissa mitattujen pisteiden välimatkoja voitiin mitata käyttämällä apuna laskentataulukkoa. Pisteistöjen kohdistamisen jälkeen muodonmuutos oli havaittavissa CloudComparessa. Kuvassa 24 näkyy ohjelman tuottama 3D näkymä pisteistöistä, jotka on rekisteröity keskenään palkin c tähysten avulla.



Kuva 24: Kohdepisteet CloudCompare- ohjelmassa

Kuvan 24 pisteistössä on neljä kiinnostavaa osaa: vasemmalla ylhäällä palkin c tähykset, keskellä kelkan k tähykset ja palkin a pisteet sekä oikealla neljä kuvanottoaikkaa.

Toisiaan vastaavien pisteiden välisen avaruussuoran pituus on kuormituksen aiheuttaman muodonmuutoksen suuruus ja sen x-, y- ja z-komponentit osoittavat muutoksen suunnan. Taulukossa 9 on keskenään kohdistettujen lepo- ja kuormitustilan pisteistöjen avulla muodostettu muutostaulukko, josta selviää muodonmuutoksen suuruus ja suunta pisteittäin.

Taulukko 10:Kohteen pisteittäinen muodonmuutos

Muodonmuutos		(mm)	(mm)	(mm)	Pist. S.(mm)
Sijainti	Piste	dx	dy	dz	s
kamera 1	0	18,075	-13,307	-2,664	22,602
kamera 2	1	8,096	2,567	4,895	9,803
kamera 3	2	-7,138	6,274	1,543	9,628
kamera 4	3	-20,680	-5,668	-5,523	22,143
kelkka	4	134,078	86,989	142,010	213,801
kelkka	5	133,184	84,919	139,096	210,468
kelkka	6	135,887	84,877	138,179	211,572
kelkka	7	134,493	89,394	136,807	211,650

kelkka	8	133,696	86,143	135,731	209,089
kelkka	9	134,930	88,713	135,350	210,703
kelkka	10	136,287	92,505	136,868	214,159
kelkka	11	136,763	92,528	136,150	214,015
kelkka	12	136,584	88,480	134,613	211,198
kelkka	13	136,557	91,386	134,640	212,431
kelkka	14	137,401	94,885	135,873	215,276
kelkka	15	137,412	96,642	136,748	216,615
kelkka	16	137,135	91,842	134,372	212,831
kelkka	17	138,270	96,874	135,294	216,351
kelkka	18	137,395	93,849	134,182	213,752
kelkka	19	137,714	94,924	134,183	214,432
kelkka	20	138,063	98,083	134,922	216,531
kelkka	21	137,355	94,900	133,891	214,008
kelkka	22	138,069	101,970	135,728	218,821
kelkka	23	137,382	99,464	134,701	216,591
kelkka	24	137,374	97,795	134,529	215,716
kelkka	25	136,560	101,977	135,739	217,883
kelkka	26	135,295	103,715	136,248	218,232
kelkka	27	134,405	107,867	136,977	220,143
kelkka	28	135,552	112,520	138,408	224,035
kelkka	29	130,334	101,860	126,461	208,219
kelkka	30	130,822	105,274	127,242	210,684
kelkka	31	129,449	101,642	125,858	207,191
kelkka	32	130,633	104,027	126,237	209,338
palkki a1	33	86,419	79,985	87,146	146,493
palkki a2	34	89,866	61,375	87,781	139,815
palkki c	35	9,182	20,830	2,606	22,913
palkki c	36	8,584	8,354	2,244	12,187
palkki c	37	5,940	-2,094	0,424	6,313
palkki c	38	3,886	-4,368	0,403	5,860
palkki c	39	1,037	-9,649	-0,361	9,712
palkki c	40	-0,684	-7,862	-0,607	7,915
palkki c	41	-1,996	-3,799	-0,146	4,294
palkki c	42	-4,354	-0,702	-0,684	4,463
palkki c	43	-5,847	2,096	-0,698	6,251
palkki c	44	-6,254	9,647	0,113	11,498
palkki c	45	-6,923	10,229	-0,340	12,356
palkki c	46	-6,493	18,648	0,810	19,763
palkki c	47	-9,608	14,664	0,304	17,534
palkki c	48	-11,369	13,451	0,850	17,632
palkki c	49	-11,877	16,954	0,316	20,703

palkki c	50	-9,561	-6,191	-10,451	15,458
palkki c	51	-9,785	-3,122	-10,242	14,505
palkki c	52	-10,913	-1,902	-10,637	15,358
Keskimääräinen muutos					
Sijainti	pist.	dx	dy	dz	s
Kamerat	0-3	-0,412	-2,533	-0,437	2,604
Kelkka	4-32	135,485	96,071	134,725	213,862
Palkki a	33-34	88,143	70,680	87,463	142,880
Palkki c	35-52	-3,724	4,177	-1,450	5,781

Tuloksia tarkastelemalla voidaan niiden huomata noudattavan muodonmuutokseen liittyviä olettamuksia:

1. Kamerat ovat liikkuneet, mutta vain vähän. Reunoilla olleet kamerat liikkuivat eniten, sillä ne on kiinnitetty palkkeihin a ja b, jotka taipuivat kuormituksessa enemmän kuin päätypalkit c ja d.
2. Kelkka, johon raskas punnus on kuormituksessa kiinnitetty, on liikkunut kuormituksen aikana eniten.
3. Palkin a keskikohta on taipunut, mutta vähemmän, kuin mitä kelkka on liikkunut.
4. Päätypalkki c:n pisteiden välinen erotus on pienin, sillä pisteistöt on kohdistettu keskenään niiden avulla.

5 Johtopäätökset

Fotogrammetrinen mittausmenetelmä soveltuu tässä työssä kuvatun suurehkon metallikappaleen muodonmuutosmittaamiseen hyvin ja ilman mittauksissa kohdattuja ongelmia, olisi menetelmä ollut paitsi nopeampi myös tarkempi. Ongelmista huolimatta mitattujen pisteiden keskimääräiseksi tarkkuudeksi mitattiin $\pm 5\text{mm}$. Mitattu muodonmuutos noudatti olettamaa muodonmuutoksen suuruudesta mitattavan kappaleen eri kohdissa. Kelkan k tähykset liikkuivat eniten, keskimäärin 134,725mm alaspäin. Palkin a muodonmuutos noin 8m päässä päätypalkista c oli keskimäärin 87,463mm alaspäin. Palkin c tähyksiä käytettiin lepo- ja kuormitustilojen pisteiden rekisteröintiin ja niiden oletettiin pysyvän lähes paikallaan, mikä voidaan havaita 5,781mm keskimääräisestä muutoksesta. Kamerat liikkuivat keskimäärin 2,604mm. Kaikki mitatut muutokset ovat

suhteellisia muutoksia, absoluuttisen muutoksen mittaamiseen vaadittaisiin absoluuttinen orientointi.

Kohteessa olevien näköesteiden ja vaativan mittausympäristön takia langattoman fotogrammetrisen mittausjärjestelmän testaaminen olisi suositeltavaa. Toimiva langaton järjestelmä sallisi kameroiden vapaamman sijoittelun kuin langallisella järjestelmällä, minkä ansiosta mittausgeometriaa saisi parannettua, mikä puolestaan parantaisi osaltaan mitatun pisteistön tarkkuutta. Myös useamman kamerasen käyttäminen mittauksessa parantaisi mittaustarkkuutta todennäköisesti entisestään. Kuvauskalustoa valittaessa tukevan rakenteen ansiosta teollisuuskamerat ovat hyvä vaihtoehto, mutta niitä on saatavilla myös paremmalla kennotekniikalla, joka voisi vaikuttaa mittaustarkkuuden paranemiseen.

Tässä työssä tarkkuutta on arvioitu vertailemalla teollisuuskameroilla mitattujen pisteiden välisiä etäisyyksiä CAD-mallin vastaaviin etäisyyksiin sekä referenssikameralla mitattuun pisteistöön. Vaikka tulokset vaikuttavatkin hyvältä, voisi tulosten validoimiseen kokeilla myös muiden menetelmien, kuten laserkeilauksen käyttöä, mikäli testattava laitteisto saadaan sijoitettua stabiilisti mittausympäristöön. Muodonmuutosmittaukseen tämän mittauksen kaltaisessa tilanteessa ei laserkeilaus menetelmänä ole välttämättä luotettava johtuen mitattavan rakenteen huojunnasta, mikä näkyy laserkeilaimen tuottamassa pisteistössä virheenä, jota lieenee vaikea arvioida tai sen suuruutta laskea. Useamman mittaustekniikan käyttäminen edellyttää yhteisen koordinaatiston käyttämistä, ja jatkotutkimuksissa mitattu kappale voitaisiinkin sitoa testikentän koordinaatistoon joko GPS-laitteiston tai maaston tukipisteiden avulla. Tällöin myös tieto testikentän vaikutuksesta muodonmuutokseen olisi mahdollista selvittää, mikäli siihen on tarvetta. Jos fotogrammetrista menetelmää päädytään käyttämään muodonmuutoksen tulkintaan jatkossa, voisi kohdetta signaloida tunnetuilla pisteillä ja rakenteeseen tehdä kiinnityspaidat kameroille, mikä tekisi mittauksen valmistelusta helpompaa ja nopeampaa sekä parantaisi tarkkuutta ja helpottaisi mittauksen tarkkuusarviointia.

Lähdeluettelo

- Bales, F.B. & Hilton, M.H. 1985. Application of Close-Range Terrestrial Photogrammetry to Bridge Structures. Virginia Highway and Transportation Research Council.
- Blanc, N. 2001. CCD versus CMOS – has CCD imaging come to an end? Photogrammetric Week 1. s.131-137. DOI: 10.1.1.4.6048.
- Brown, D. 1966. Decentering distortion of Lenses, Photogrammetric Engineering. Vol. 32:3. s.444-462.
- Brown, D. 1971. Close-Range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering. Vol. 37. s. 855-866.
- Cronk, S., Fraser, C. & Hanley, H. 2006. Automated metric calibration of colour digital cameras. The Photogrammetric Record 21 (116). s. 355-372. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2006.00380.x
- Ellis S. 1998. Instability of Least Squares, Least Absolute Deviation and Least Median of Squares Linear Regression. Statistical Science Vol. 13:4, s.337-350.
- Fraser, C. 2012. Automatic Camera Calibration in Close-Range Photogrammetry. ASPRS 2012 Annual Conference. Sacramento, California. 19-23.3.2012.
- Gauss, C.F. 1995. Theory of the Combination of Observations Least Subject to Errors. SIAM Press, Philadelphia, PA, 1995. Kääntänyt ja kommentoinut G.W. Stewart. ISBN: 1611971241, 9781611971248.
- Gordon S. J., Lichti D.D., Franke J. & Stewart M.P. 2004. Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering. Nottingham, Englanti. 28.6-1.7.2004.

Gordon S. J., Lichti D.D., Stewart M.P. & Franke J. 2012. Modelling point clouds for precise structural deformation measurement. Käyty 10.12.2014. www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm5/papers/185.pdf

Heikkinen, J. 2005. The circular imaging block in close-range photogrammetry. Helsinki University of Technology- Institute of Photogrammetry and Remote Sensing. ISBN 951-22-7966.

Horn, B. 1989. Relative orientation. Massachusetts Institute of Technology, the artificial intelligence laboratory Memo No. 994-A.

Inkilä, K. 2012a. Analyyttinen Fotogrammetria I –kurssin luentomoniste. 263 sivua. Aalto-yliopisto, Insinöörیتieteiden korkeakoulu, Maankäyttötieteiden laitos, Espoo, 2012.

Inkilä, K. 2012b. Analyyttinen Fotogrammetria II –kurssin luentomoniste. 203 sivua. Aalto-yliopisto, Insinöörیتieteiden korkeakoulu, Maankäyttötieteiden laitos, Espoo, 2012.

Inkilä, K. 2012c. Analyyttinen Fotogrammetria I –kurssin luentomoniste. 191 sivua. Aalto-yliopisto, Insinöörیتieteiden korkeakoulu, Maankäyttötieteiden laitos, Espoo, 2012.

Inkilä, K. 2012d. PNS-Menetelmiä. 253 sivua. Aalto-yliopisto, Insinöörیتieteiden korkeakoulu, Maankäyttötieteiden laitos, Espoo, 2012.

Luhman, T. 2010. Close range photogrammetry for industrial applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing volume 65 issue 5. s. 558-569. doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003

Nikon. 2014. Nikon Digital SLR Camera D800/D800E Specifications. Käyty 3.1.2015. <http://imaging.nikon.com/lineup/dslr/d800/spec.htm>

Remondino, F. & Fraser, C. 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), s. 266-272.

Rönnholm P., Nuikka M., Suominen A., Salo P., Hyypä H., Pöntinen P., Haggrén H., Vermeer M., Puttonen J., Hirsi H., Kukko A., Kaartinen H., Hyypä J. & Jaakkola A. 2009. Comparison of Measurement Techniques and Static Theory Applied to Concrete Beam Deformation. *The Photogrammetric Record* 24(128). s. 351-371. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2009.00548.x

Sampath A., Moe D. & Christopherson J. 2012. Two Methods for Self Calibration of Digital Camera. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B1, 2012. s. 261-266. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-261-2012

Smith, S. 2001. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Luku 23. s.373-296. www.dspguide.com. Käyty 4.1.2015.

Stolkin R. 2007. *Scene Reconstruction, Pose Estimation and Tracking*. I-Tech Education and Publishing. ISBN 978-3-902613-06-6

Triggs, B. 1997. Autocalibration and the Absolute Quadric. *International Conference on Computer Vision & Pattern Recognition (CVPR '97)*, kesäkuu 1997, San Juan, Puerto Rico. IEEE Computer Society, s. 609-614, <<http://ieeexplore.ieee.org/xpls/absall.jsp?arnumber=609388>>.

Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R. & Fitzgibbon, A. 2000. Bundle Adjustment – A Modern Synthesis. *Vision Algorithms: Theory and Practice In Vision Algorithms: Theory and Practice*, Vol. 1883. s. 298-372. DOI:10.1007/3-540-44480-7_21.

Tsakiri, M., Ioannidis, C., Papanikos, P. & Kattis, M. 2004. Load Testing Measurements for Structural Assessment Using Geodetic and Photogrammetric Techniques. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering. Nottingham, Englanti, 28.6 – 1.7.2004.

Tsakiri, M., Lichti, D. & Pfeifer, N., 2006. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring. 3:s IAG/ 12:s FIG konferenssi, Baden, Itävalta. 10 sivua. Käyty 9.3.2015. http://www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/LS2/Tsakiri.pdf

UPC Universitat Politècnica de Catalunya, Cyrax 2500 tekniset tiedot. Käyty 4.2.2015. http://www.upc.edu/sct/documents_equipament/d_290_id-717.pdf

Wood Handbook 1987. United States Department of Agriculture, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. ISBN 10: 0160000432.

Zhang, Y., Hu, K. & Huang, R. 2012. Bundle adjustment with additional constraints applied to imagery of the Dunhuang wall paintings. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 72 (2012). s. 113–120. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2012.06.008

Zheng, S., Wang, Z. & Huang, R. 2015. Zoom lens calibration with zoom- and focus-related intrinsic parameters applied to bundle adjustment. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 102, Huhtikuu 2015. s. 62-72. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2015.01.005